

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



**Os sistemas energéticos para habitação  
autossustentável em clima Português: simulação e  
análise energética**

**Sérgio André Ferreira Dias**

Dissertação

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Orientado pelo Prof. Doutor Guilherme Carrilho da Graça

2015

## **Abstract**

In 2010, the European Union launched the Directive 2010/31/EU on the Energy Performance of Buildings, with the objective of improving the energy performance of buildings taking into account local bioclimatic conditions. This policy also aims to enforce the requirement of all new buildings to be infrastructure with nearly zero- energy NZEB (Nearly Zero Energy Building), as from December 2020 .

This study portrays a typical single-family housing in the context NZEB (Net Zero Energy Building) through a photovoltaic system in Portuguese climate. Taking into consideration the great climatic diversity throughout the Portuguese territory, four geographical areas were selected with different characteristics to target this study - the areas selected were: Bragança, Coimbra, Lisbon and Faro.

Using the EnergyPlus program, dynamic simulations were made of the parameters that influence energy efficiency in a building, being its geometry and orientation; the type of cooling system; and finally, its lighting efficiency and appliance efficiency. There were analyzed all of the variations of these parameters in order to identify the best configuration possible of constituents in the building systems, taking simultaneously an energy and environmental perspective. With the purpose to study the influence of geometry on the thermal behavior of a building, two models with distinct geometries were analyzed: a model called "Passive House" - which represents a housing provided with "passive solar construction", with low needs of heating and cooling; and a second model, called "House Glazed" - that represents a house with large glass areas, which tend to have higher energy requirements in the cooling season.

Through the Solterm program, photovoltaic and solar thermal solar systems were sized so as to meet the annual energy needs for each model. It was also analyzed the economic impacts of solar photovoltaic system to verify its viability in each building

**Key-words:** Thermic behavior, energy efficiency, EnergyPlus , NZEB

## Resumo

Em 2010, a União Europeia lançou a Diretiva 2010/31/EU para o Desempenho Energético de Edifícios, tendo como objetivo a melhoria do desempenho energético dos edifícios atendendo às condições bioclimáticas locais. Esta diretiva também visa obrigar todos os edifícios novos a serem edifícios com necessidades quase nulas de energia, *nZEB* (*Nearly Zero Energy Building*), a partir de Dezembro de 2020.

Este trabalho enquadra uma típica habitação unifamiliar, no contexto *NZEB* (*Net Zero Energy Building*), através de um sistema fotovoltaico, em clima português. Tendo em conta a grande diversidade climática ao longo de todo o território português, foram selecionadas quatro áreas geográficas com características distintas para alvo deste estudo – as regiões escolhidas foram: Bragança, Coimbra, Lisboa e Faro.

Com recurso ao programa *EnergyPlus*, foram realizadas simulações dinâmicas dos parâmetros que influenciam a eficiência energética num edifício, nomeadamente a sua geometria e orientação; tipo de sistema de climatização; eficiência da iluminação e eficiência dos eletrodomésticos. Foram analisadas as variações destes parâmetros, para identificar a melhor configuração dos sistemas constituintes do edifício, numa perspetiva energética e ambiental.

Com objetivo de analisar a influência da geometria no comportamento térmico de um edifício, foram analisados dois modelos com geometrias distintas: um modelo denominado “Casa Passiva” – que representa uma habitação provida com “construção solar passiva”, com baixas necessidades de aquecimento e arrefecimento; e um segundo modelo, denominado de “Casa Envidraçada” – na qual representa uma habitação com grandes áreas envidraçadas, que tende a ter maiores necessidades energéticas na estação de arrefecimento.

Através do programa *Solterm*, foram dimensionados os sistemas solar térmico e solar fotovoltaico, de modo a atender a necessidade energética anual para cada modelo. Foram também analisados os impactos económicos do sistema solar fotovoltaico para verificar a sua viabilidade em cada edifício.

**Palavras-chave:** Comportamento térmico, eficiência energética, EnergyPlus, NZEB.

# Índice

1.	Introdução .....	1
1.1	Enquadramento .....	1
2.	Conceitos Teóricos.....	1
2.1	Conceito <i>Net Zero Energy Buildings (NZEB)</i> .....	1
2.2	Transferência de calor .....	2
2.2.1	Condução.....	3
2.2.2	Convecção .....	3
2.2.3	Radiação .....	4
2.3	Conforto térmico.....	5
3.	Soluções para a melhoria da eficiência energética .....	6
3.1	Soluções passivas .....	6
3.1.1	Orientação do edifício .....	7
3.1.2	Envolvente do edifício .....	8
3.1.3	Ventilação natural .....	8
3.1.4	Iluminação natural.....	9
3.2	Soluções ativas .....	9
3.2.1	Iluminação artificial .....	9
3.2.1	Eletrodomésticos .....	10
3.2.2	Energia Solar Térmica.....	11
3.2.3	Energia Fotovoltaica .....	12
3.3	Sistemas de climatização .....	16
3.3.1	Sistemas de emissão .....	16
3.3.2	Bombas de calor .....	17
4.	Simulação dinâmica computacional – <i>EnergyPlus</i> .....	19
5.	Caso de estudo .....	24

5.1	Arquitetura e materiais .....	24
5.2	Climatização e ventilação .....	26
5.3	Produção de energia.....	27
6.	Simulação com o <i>EnergyPlus</i> .....	28
6.1	Modelação geométrica e zoneamento.....	28
6.2	Enquadramento climático do edifício .....	28
6.3	Infiltração e ventilação natural .....	29
6.4	Previsão das cargas térmicas .....	30
6.5	Sistemas de climatização .....	30
6.5.1	Sistema de emissão – Piso radiante.....	30
6.5.2	Bomba de calor ar-ar .....	31
6.5.3	Bomba de calor geotérmica.....	31
6.5.4	Chiller e caldeira .....	32
6.6	Água quente sanitária (AQS).....	32
7.	Resultados.....	33
7.1	Simulação em regime livre .....	33
7.2	Influência da orientação no edifício .....	37
7.3	Consumo energético dos eletrodomésticos e iluminação .....	40
7.4	Consumo energético na climatização .....	41
7.5	Consumo energético para AQS .....	45
7.6	Consumos energéticos globais.....	45
8.	Impactos ambientais.....	48
9.	Produção energética .....	49
9.1	Sistema solar térmico.....	49
9.2	Sistema solar fotovoltaico .....	50
10.	Análise de custo do sistema fotovoltaico .....	51
11.	Análise simples do tempo de retorno do investimento e lucro do sistema fotovoltaico	52
12.	Conclusão .....	56

13.	Referências .....	58
14.	Anexo A – Cálculo do consumo energético – Máquina de lavar roupa.....	60
15.	Anexo B – Cálculo do consumo energético – Máquina de lavar louça .....	61

## Índice de tabelas

Tabela 1 – Consumo energético: Máquina de lavar roupa.....	11
Tabela 2 – Consumo energético: Máquina de lavar louça .....	11
Tabela 3 – Valor $V_{CIEG,2015}$ .....	15
Tabela 4 – Área envidraçada por divisão .....	25
Tabela 5 – Envolvente do edifício e coeficientes de transmissão térmica .....	26
Tabela 6 – Necessidades de ventilação de ar novo .....	27
Tabela 7- Necessidades de aquecimento e arrefecimento .....	40
Tabela 8- Consumo energético dos eletrodomésticos .....	40
Tabela 9- Consumo energético na iluminação .....	41
Tabela 10- Consumo energético – Bomba de calor ar-ar.....	42
Tabela 11- Consumo energético – Bomba de calor geotérmica.....	42
Tabela 12- Consumo energético – Chiller e caldeira .....	43
Tabela 13- Emissões de $CO_2$ .....	48
Tabela 14 – Energia térmica fornecida pelo sistema solar térmico e pelo sistema de apoio ...	49
Tabela 15 – Energia elétrica fornecida pelo sistema solar fotovoltaico – Lisboa.....	50
Tabela 16 – Energia elétrica fornecida pelo sistema solar fotovoltaico – Bragança.....	50
Tabela 17 – Energia elétrica fornecida pelo sistema solar fotovoltaico – Coimbra.....	50
Tabela 18 – Energia elétrica fornecida pelo sistema solar fotovoltaico – Faro .....	51
Tabela 19 – Custo do sistema solar fotovoltaico – Lisboa.....	51
Tabela 20 – Custo do sistema solar fotovoltaico – Bragança .....	52
Tabela 21 – Custo do sistema solar fotovoltaico – Coimbra.....	52
Tabela 22 – Custo do sistema solar fotovoltaico – Faro .....	52
Tabela 23 - Tempo de retorno do investimento (anos) para cada casa em cada região .....	53

## Índice de figuras

Figura 1 – Transmissão de calor por condução, convecção e radiação. (PennState, 2014) .....	2
Figura 2 – a) Escala de sensibilidade térmica (PMV), b) Relação entre PPD e PMV. (Águas, 2011).....	6
Figura 3 – Radiação solar ao longo do ano por orientação. (DGEG) .....	7
Figura 4 – Radiação solar na fachada a Sul, a) Solstício de inverno, b) Solstício de Verão. (DGEG) .....	8
Figura 5 – Sistemas Solares Térmicos: a)Esquema em termossifão, b)Esquema circulação forçada. (painelsolartérmico) .....	12
Figura 6 – Sistemas Solares Fotovoltaicos: a) Esquema sistema fotovoltaico autónomo, b) Esquema sistema fotovoltaico ligado à rede eléctrica. (UNIA, 2012) .....	14
Figura 7 – Esquema do circuito de uma bomba de calor. (Swardt Meyer, 2001).....	17
Figura 8 – Principais fontes de calor e formas de captação. (Calefi, 2009).....	18
Figura 9 – Aspeto visual <i>IDF Editor</i> .....	20
Figura 10 – Aspeto visual <i>EP-Launch</i> .....	20
Figura 11 – Estrutura do EnergyPlus. (Crawley, 1999) .....	21
Figura 12 – Arquitetura e planta da casa passiva e da casa envidraçada. (Graça, 2006) .....	24
Figura 13 – Esquema dos sistemas constituintes do edifício. (Graça, 2012) .....	28
Figura 14 – Frequências da temperatura interior para a casa envidraçada em cada região. ....	33
Figura 15 – Frequências da temperatura interior para a casa passiva em cada região. ....	34
Figura 16 – Temperatura interior para a casa envidraçada e casa passiva num dia típico em janeiro para cada região.....	35
Figura 17 – Temperatura interior para a casa envidraçada e casa passiva num dia típico em julho para cada região.....	36
Figura 18 – Necessidades de climatização para diferentes orientações da fachada, Lisboa. ...	37
Figura 19 – Necessidades de climatização para diferentes orientações da fachada, Bragança.	37
Figura 20 – Necessidades de climatização para diferentes orientações da fachada, Coimbra.	38



Figura 21 – Necessidades de climatização para diferentes orientações da fachada, Faro. ....	38
Figura 22 – Necessidades de aquecimento e arrefecimento.....	39
Figura 23 – Consumo energético na climatização: Casa envidraçada. ....	43
Figura 24 – Consumo energético na climatização: Casa passiva.....	44
Figura 25 – Consumo energético na climatização. ....	44
Figura 26 – Consumo energético: Lisboa. ....	45
Figura 27 – Consumo energético: Bragança. ....	46
Figura 28 – Consumo energético: Coimbra. ....	47
Figura 29 – Consumo energético: Faro.....	47
Figura 30 – Senário da rentabilidade financeira do sistema fotovoltaico: Lisboa .....	53
Figura 31 – Senário da rentabilidade financeira do sistema fotovoltaico: Bragança .....	54
Figura 32 – Senário da rentabilidade financeira do sistema fotovoltaico: Coimbra .....	54
Figura 33 – Senário da rentabilidade financeira do sistema fotovoltaico: Faro.....	55

## 1. Introdução

### 1.1 Enquadramento

Atendendo à atual crise económica que a Europa atravessa, aliada a uma forte dependência energética, torna-se preponderante a redução do consumo energético e a alteração do padrão de consumo para energias endógenas.

Com a consciencialização crescente para as consequências que os gases com efeito de estufa têm no meio ambiente, em 1997 a União Europeia comprometeu-se através do Protocolo de Quioto da Convenção – Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas, reduzir até 2020, as emissões de gases com efeito de estufa, em pelo menos 20% em relação aos níveis de 1990. Deste modo, será esperado, a longo prazo, manter a subida de temperatura global abaixo dos 2°C.

Em 2010, o sector dos edifícios representavam cerca de 40% do consumo total de energia na União Europeia – o que reflete a importância da necessidade de redução do consumo de energia e a utilização de energias renováveis neste sector.

Em Portugal, segundo a Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), o sector dos edifícios é responsável pelo consumo de aproximadamente 30% da energia final. Este consumo pode ser reduzido em mais de 50% através de medidas de eficiência energética, o que representa uma redução anual de 400 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>. Esta redução permite atingir praticamente todos os objetivos propostos pela União Europeia no âmbito do Protocolo de Quioto.

## 2. Conceitos Teóricos

### 2.1 Conceito *Net Zero Energy Buildings (NZEB)*

O *Net Zero Energy Buildings (NZEB)* refere-se a edifícios com baixas necessidades energéticas dotados de microgeração ligados à rede elétrica, em que o balanço anual de energia é nula, ou seja, a energia entregue à rede é pelo menos igual à energia consumida.

Um *NZEB* deverá apresentar as seguintes especificações:

- sistemas de ventilação e iluminação natural adequados;
- otimização de sistemas passivos de aquecimento e arrefecimento;

- utilização de equipamentos eficientes;
- otimização do isolamento térmico;
- dimensionamento adequado de sistemas de energias renováveis.

O artigo 9 da diretiva 2010/31/EU do Parlamento Europeu e Conselho emitida a 19 de Maio de 2010, visa a que todos os estados membros assegurem que:

- até 31 de Dezembro de 2020 todos os novos edifícios sejam *NZEB*;
- a partir de 31 de Dezembro de 2018 todos os edifícios novos ocupados e detidos por entidades públicas sejam *NZEB*.

Contudo, os Estados Membros podem decidir não aplicar estes requisitos em determinados edifícios, caso se justifique que a análise de custo – benefício do ciclo de vida económico do edifício em questão seja negativa.

## 2.2 Transferência de calor

A transferência de calor é um fenómeno que ocorre devido à diferença de temperaturas entre dois ou mais meios, sempre no sentido do meio com temperatura mais elevada para o meio com temperatura mais baixa. No caso de um edifício, as trocas de calor advêm principalmente com o meio ambiente.

Existem três mecanismos de transferência de calor, condução, convecção e radiação, representadas na *Figura 1*. A condução e convecção requerem a presença de um meio físico para a troca de calor, por outro lado, a radiação não necessita de um meio físico para a transmissão de calor.

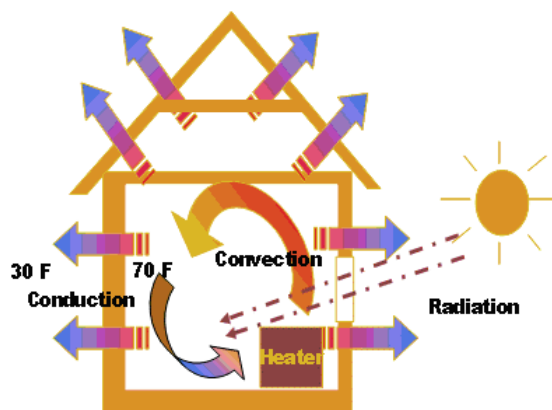


Figura 1 – Transmissão de calor por condução, convecção e radiação. (PennState, 2014)

### 2.2.1 Condução

A condução deve-se às interações entre partículas num meio físico, onde ocorre transferência de energia das partículas mais energéticas, para as partículas menos energéticas.

A transferência de calor por condução é regida pela lei de Fourier. Esta lei permite determinar o fluxo de calor transmitido unidireccionalmente, através de um elemento, tendo em conta a condutividade térmica e o gradiente de temperaturas desse elemento. Esta lei pode ser expressa pela seguinte equação:

$$q_{cond} = -\lambda \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

Onde,

$q_{cond}$  – o fluxo de calor transmitido por condução [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

$\lambda$  – a condutividade térmica do elemento [ $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]

$\frac{dT}{dt}$  – o gradiente de temperatura [ $\text{K.m}^{-1}$ ]

### 2.2.2 Convecção

A convecção é um mecanismo de transmissão de calor, que ocorre quando existe contacto entre um sólido e um fluido. No caso de um edifício, a convecção ocorre através do contacto da envolvente do edifício com o ar.

Tipicamente, a energia é transferida como calor sensível, contudo poderá também existir troca de calor latente, que está associada a uma mudança de fase do fluido. No caso de um edifício, esta mudança de fase advém principalmente da condensação do ar, formando partículas de água, que em certas ocasiões se pode verificar sobretudo junto às janelas.

A lei do arrefecimento de Newton, permite determinar o fluxo de calor, por convecção, entre uma superfície sólida e um fluido, expressa na seguinte equação:

$$q_{conv} = h_c \cdot (T_s - T_\infty) \quad (2)$$

Onde,

$q_{\text{conv}}$  – o fluxo de calor transmitido por convecção [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

$h_c$  – coeficiente de transferência de calor por convecção [ $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ]

$T_s$  – temperatura da superfície [K]

$T_\infty$  – temperatura do fluido [K]

### 2.2.3 Radiação

Radiação é a energia emitida por um corpo que se encontre a uma temperatura superior a zero absoluto (0K), sendo a sua transmissão realizada por ondas eletromagnéticas ou, alternativamente, fótons.

Uma superfície, com poder de emissão de radiação ideal, é chamado de corpo negro, sendo a sua emissividade é igual a 1. A lei de Stefan-Boltzmann relaciona o calor emitido por um corpo negro com a sua temperatura absoluta. Contudo, o fluxo de calor emitido por uma superfície real é inferior a de um corpo negro à mesma temperatura, sendo a sua emissividade inferior a 1, esse fluxo de calor é expresso pela seguinte equação:

$$q_{\text{rad}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (3)$$

Onde,

$q_{\text{rad}}$  – o fluxo de calor transmitido por radiação [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

$\varepsilon$  – emissividade da superfície

$\sigma$  – constante de Stefan-Boltzmann [ $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ ]

$T_s$  – temperatura da superfície [K]

### 2.3 Conforto térmico

O conforto térmico é essencial para o bem-estar dos ocupantes num edifício, contudo, este é subjetivo devido a fatores físicos, fisiológicos e psicológicos de cada indivíduo (Lamberts, 2011). Por outro lado, existem fatores que se podem quantificar, tais como os parâmetros individuais (atividade do ocupante, vestuário) e os parâmetros ambientais (temperatura do ar, humidade do ar, velocidade do ar, temperatura média radiante).

A norma internacional de conforto térmico EN ISO 7730, tem como base o modelo estatístico para o conforto térmico desenvolvido por Fanger. Esta norma utiliza o índice PMV (*Predicted Mean Vote*) no qual classifica o nível de insatisfação do conforto térmico dos ocupantes, representado na figura 2.a). Utiliza também o índice PPD (*Percentage of People Dissatisfied*), que estabelece a percentagem ocupantes insatisfeitos termicamente correlacionado com o índice PMV, ilustrados na figura 2.b). Os índices PMV e PPD são calculados através das seguintes equações:

$$PMV = (0,303 * e^{-0,036M} + 0,0028) * S \quad (4)$$

Onde,

M – o fluxo de calor transmitido por radiação [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

S – emissividade da superfície

$$PPD = 100 - 95 * e^{(-0,03353*PMV^4 - 0,2179*PMV^2)} \quad (5)$$

A norma ISO 7730 considera aceitável ambientes térmicos quando até 10% dos ocupantes mostram-se descontentes, em que  $-0,5 < PMV < 0,5$ .

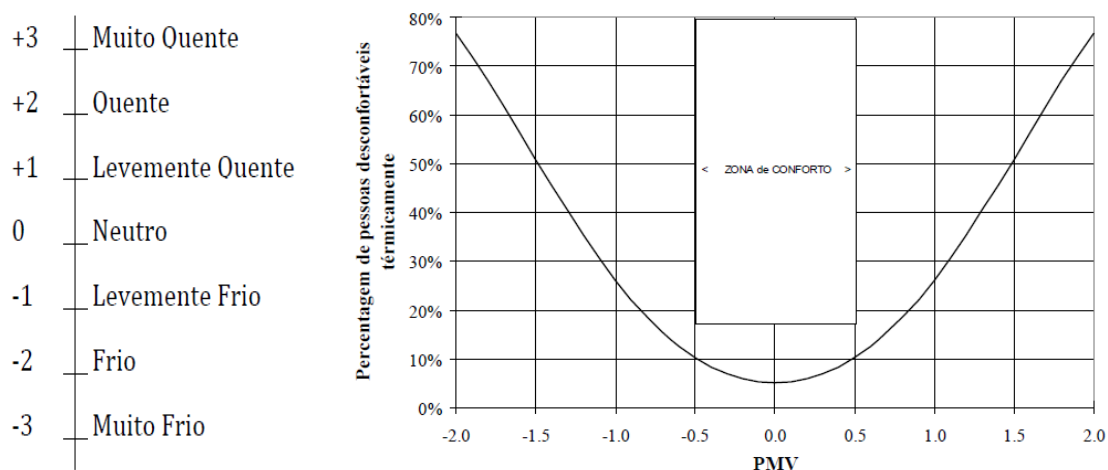


Figura 2 – a) Escala de sensibilidade térmica (PMV), b) Relação entre PPD e PMV. (Águas, 2011)

### 3. Soluções para a melhoria da eficiência energética

A eficiência energética passa por melhorar o desempenho energético e o comportamento térmico no edifício, ou seja, procura soluções que proporcionem o máximo conforto aos ocupantes, com reduzido consumo de energia.

A otimização do desempenho energético de um edifício deverá conter sistemas passivos, que permitam a redução das necessidades energéticas na climatização, iluminação e ventilação, assim como sistemas ativos, nomeadamente painéis solares para aquecimento de AQS, produção de eletricidade e sistemas adequados de climatização.

O comportamento destes sistemas é influenciado pelas características bioclimáticas da região na qual se inserem, tais como a radiação solar, humidade, temperatura do ar exterior, entre outros.

#### 3.1 Soluções passivas

As soluções passivas são soluções naturais integradas na construção do edifício, têm como objetivo: otimizar os ganhos solares e reduzir as perdas térmicas de forma a reduzir as necessidades de climatização; dotar o edifício de ventilação natural para assegurar a boa qualidade do ar interior; prover o edifício de iluminação natural para reduzir os gastos

Os sistemas energéticos para habitação autossustentável em clima Português: simulação e análise energética

---

energéticos com a iluminação. As soluções passivas, quando corretamente dimensionadas, podem reduzir significativamente a necessidade energética do edifício.

### 3.1.1 Orientação do edifício

A orientação do edifício deve ter em conta o percurso solar, de modo a ter um aproveitamento otimizado deste recurso, para o conforto térmico e luminoso. A fachada, que recebe maior radiação solar ao longo do ano, é a fachada virada a Sul, como demonstra a *Figura 3* de um estudo feito para a cidade de Lisboa. Esta particularidade é característica para todas as regiões de Portugal. Para melhor aproveitamento deste recurso, a fachada com maior área envidraçada deverá, por isso, estar orientada a Sul.

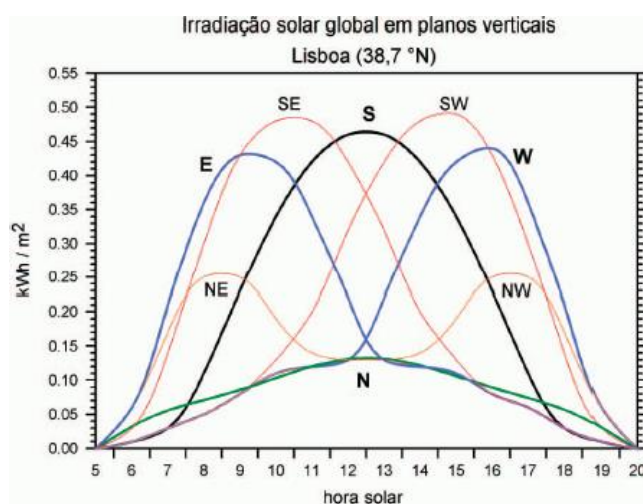


Figura 3 – Radiação solar ao longo do ano por orientação. (DGEG)

No inverno, esta orientação tem grande vantagem. Nesta estação do ano existe maior necessidade de aquecimento, pelo que é importante que o edifício tire o máximo partido da radiação solar. Como exemplificado na *Figura 4.a*), no inverno o ângulo da altura solar é baixo, possibilitando assim, que a fachada orientada a Sul receba maior radiação direta e, consequentemente, maior ganho solar.

No verão torna-se necessário controlar os ganhos solares para reduzir as necessidades de arrefecimento. Como o ângulo da altura solar no verão é elevado (*Figura 4.b*)), o edifício deve estar dotado de palas de sombreamento, ou de outro tipo de sombreamento, para restringir a incidência da radiação direta.



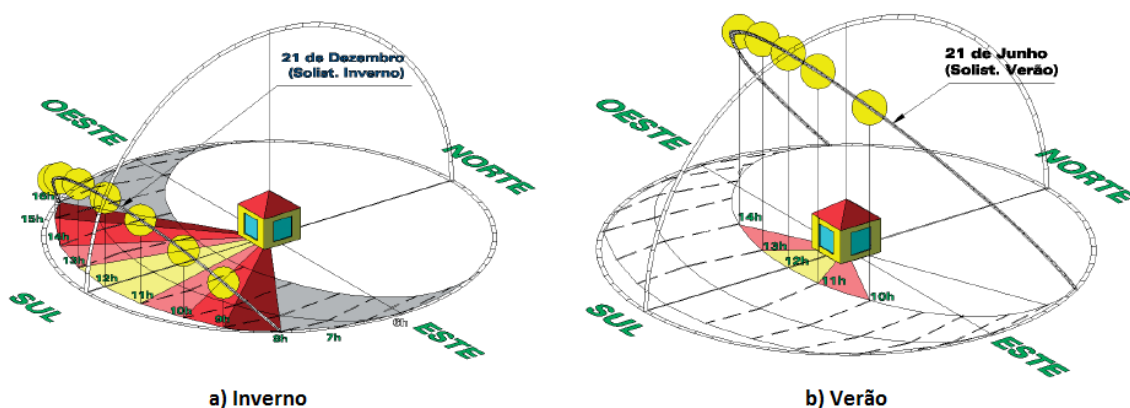


Figura 4 – Radiação solar na fachada a Sul, a) Solstício de inverno, b) Solstício de Verão.  
(DGEG)

### 3.1.2 Envolvente do edifício

A envolvente do edifício diz respeito à estrutura que delimita o interior do edifício do exterior. É através dos vários constituintes da envolvente do edifício que se dá grande parte das perdas e ganhos de energia, devido à transmissão de calor por condução – no inverno, perdendo calor; e no verão, com ganhos de calor. Como tal, é importante o edifício estar dotado de materiais com boa resistência térmica, tendo sempre em conta as características bioclimáticas da região em que se insere.

A incorporação de materiais isolantes como cortiça, poliestireno expandido, poliuretano ou lãs minerais, no caso da envolvente opaca (paredes, coberturas e pavimentos); assim como vidros duplos, nos vãos envidraçados, permitem aumentar a inércia térmica do edifício. Deste modo, é possível uma maior estabilização das temperaturas interiores, em relação às oscilações térmicas exteriores.

### 3.1.3 Ventilação natural

A ventilação natural de um edifício processa-se através de trocas de massa de ar entre o interior e o exterior. Este fenómeno ocorre devido às diferenças de temperatura e da pressão provocada pelo vento na envolvente do edifício. Para uma boa qualidade de ar interior e para um maior conforto dos ocupantes, é importante que haja uma renovação adequada de ar. A renovação do

ar interior pode ser feita através da ventilação natural do edifício e/ou com recurso a ventilação mecânica.

A portaria nº349-B do decreto de lei DL118/2013 impõe uma taxa de renovação horaria de ar igual ou superior a 0,4 renovações por hora (RPH). Caso o edifício tenha um défice na renovação de ar novo, a qualidade do ar interior pode deteriorar-se – existe aumento crescente de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e de humidade no ar levando a fenómenos de condensação – o que leva a um maior desconforto interior. Por outro lado, se houver um excesso de renovação de ar, pode por em causa o conforto térmico dos ocupantes.

### **3.1.4 Iluminação natural**

Durante o dia é importante que a geometria do edifício possibilite um bom aproveitamento da luz natural no seu interior. O correto dimensionamento e posicionamento dos vãos envidraçados, assim como a existência de uma ou mais claraboias, proporcionam grande quantidade de luz natural e normalmente evitam zonas mal iluminadas. Deve-se também ter em conta a cor das superfícies, cores claras ou brancas nas caixilharias; paredes junto às janelas permitem otimizar o aproveitamento da luz natural; superfícies de cor clara refletem melhor a luz natural aumentando a difusão de luz por toda a divisão.

## **3.2 Soluções ativas**

### **3.2.1 Iluminação artificial**

Para uma iluminação eficiente e confortável para os habitantes, deve-se escolher de forma criteriosa o tipo de lâmpadas, luminárias e o seu posicionamento, tendo em conta as necessidades e fins específicos (ADENE, 2011).

A eficiência de uma lâmpada está relacionada com a potência (W) e o fluxo luminoso (lúmen) que a lâmpada consegue fornecer. Quanto menor a potência para o mesmo fluxo luminoso, mais eficiente será a lâmpada. Atualmente, as lâmpadas que apresentam maior rendimento são as lâmpadas LED (*Light Emitting Diode*), comparando com as lâmpadas tradicionais estas têm menor consumo energético e possuem um período de vida bastante superior.

Na escolha de uma lâmpada, para além da potência e do fluxo luminoso, existem várias características que se devem ter em consideração, conforme as atividades a desenvolver em

determinado local. O índice de restituição de cor (IRC) diz respeito à capacidade de reprodução de cores. Segundo o estudo “*A luz certa em sua casa*” de 2011 da ADENE, este recomenda a utilização de lâmpadas com IRC próximo dos 100, para locais que exijam uma perceção mais correta das cores. Outra característica a ter em conta é a *Temperatura da Cor* (Tc) – por exemplo, na cozinha é necessária uma luz de cor mais branca, devendo-se escolher uma lâmpada com um Tc maior (mais fria); por outro lado, no quarto, deve-se escolher uma luz com um Tc menor (mais quente) que apresenta uma cor mais amarelada.

### 3.2.1 Eletrodomésticos

Segundo o estudo “*Inquérito ao consumo de energia no sector doméstico*” de 2010 da Direção Geral de Energia e Geologia, a cozinha é responsável por 40,5% do consumo de eletricidade numa habitação e grande parte deste consumo está associado aos eletrodomésticos. É preponderante utilizar eletrodomésticos mais eficientes com classificação energética A ou superior, como também tomar conhecimento sobre a correta utilização dos mesmos.

Os eletrodomésticos com maior consumo energético são: o frigorífico/combinado, a máquina de lavar roupa, o forno elétrico e a máquina de lavar louça. Contudo, começam a surgir no mercado máquinas de lavar roupa e máquinas de lavar louça que permitem reduzir substancialmente os seus consumos – são denominadas de máquinas bitérmicas. As máquinas bitérmicas utilizam duas entradas de água independentes, que permitem a entrada de água fria da rede e água quente do sistema de AQS, que pode ser aquecida através de caldeira, termoacumulador ou painéis solares térmicos.

No presente trabalho, foram analisados os consumos energéticos de duas máquinas de lavar roupa, uma bitérmica e a outra convencional com características semelhantes e com a mesma classe energética. Foram também estudados os consumos energéticos de duas máquinas de lavar louça, uma bitérmica e a outra convencional com características semelhantes e com a mesma classe energética.

Por fim, foi efetuado um estudo prospetivo sobre os consumos energéticos das máquinas bitérmicas, providas integralmente de água quente pelo sistema solar térmico, através de estimativa simples (que se encontra em anexo) baseada na 1ª Lei da Termodinâmica.

As conclusões sobre a potencialidade das máquinas bitérmicas, alimentadas por painéis solares térmicos na redução do consumo energético, podem ser apreciadas nas *Tabelas 1 e 2*.

Tabela 1 – Consumo energético: Máquina de lavar roupa

Marca/Modelo	Característica	Classe eficiência energética	Capacidade de carga	Consumo de energia anual*
Bosch/WAQ24417EE	Bitérmica	A+++	7 Kg	62 kWh/ano**
Bosch/WAQ20367EE	Normal	A+++	7 Kg	174 kWh/ano
* Com base em 220 ciclos de lavagem a 60°C e 40°C e com meia e carga completa				
**Com base no fornecimento de água quente solar a 40°C				

Uma máquina de lavar roupa convencional consome em média 174 kWh por ano, por outro lado, uma máquina de lavar roupa bitérmica consome em média 62 kWh por ano, pelo que a diferença se traduz na redução de 64% o consumo de energia.

Tabela 2 – Consumo energético: Máquina de lavar louça

Marca/Modelo	Característica	Classe eficiência energética	Capacidade de carga	Consumo de energia anual*
Bosch/SMV63M60EU	Bitérmica	A++	13 Serviços	110 kWh/ano**
Bosch/SMV58N70EP	Normal	A++	13 Serviços	262 kWh/ano
* Com base em 280 ciclos de lavagem no programa ECO 50, com água a 50 °C				
**Com base no fornecimento de água quente solar a 40°C				

Uma máquina de lavar louça convencional consome em média 262 kWh por ano, por outro lado, uma máquina de lavar louça bitérmica consome em média 110 kWh por ano, traduzindo-se em uma redução de 58% o consumo de energia.

### 3.2.2 Energia Solar Térmica

A utilização mais comum da energia solar térmica é a produção de água quente sanitária (AQS). O seu funcionamento baseia-se na captação da energia solar, transformando-a em calor que irá aquecer o líquido térmico contido no painel. Este líquido térmico, por sua vez, irá aquecer a água contida no depósito acumulador através de um permutador de calor.

Os sistemas solares térmicos necessitam sempre de uma fonte de energia que complemente ou substitua a energia solar, caso esta não seja suficiente ou não esteja disponível. Este apoio complementar é baseado em sistemas convencionais para produção de AQS, como caldeira; resistência elétrica, bomba de calor, entre outros.

Os sistemas solares térmicos mais comuns em habitações são os sistemas termossifão e sistemas de circulação forçada.

O sistema termossifão, apresentado na *Figura 5.a*), é um sistema simples e económico. Neste sistema, a circulação do fluido térmico ocorre por convecção natural, não necessitando de uma bomba elétrica. Contudo, este sistema apresenta o inconveniente de colocação do depósito acumulador no exterior a uma altura superior à dos painéis.

O sistema de circulação forçada, apresentado na *Figura 5.b*), é um sistema cuja circulação do fluido térmico do circuito primário é realizada através de uma *bomba circuladora*, comandada pelo sistema de controlo. Este sistema tem como vantagens: a instalação do depósito acumulador no interior da habitação, possibilitar um maior caudal de água e controlar a temperatura da água, através de um sistema de controlo. Uma vez que se trata de um sistema mais complexo, apresenta a desvantagem de também ser menos económico, comparativamente ao sistema termossifão.

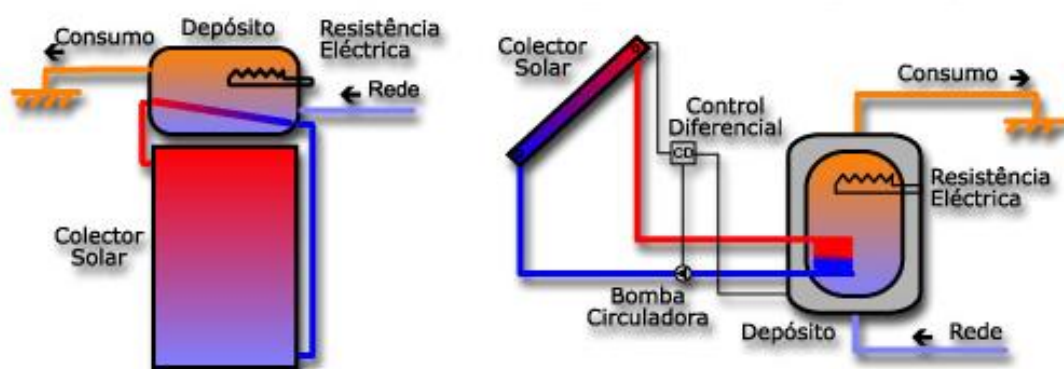


Figura 5 – Sistemas Solares Térmicos: a)Esquema em termossifão, b)Esquema circulação forçada. (painelsolartérmico)

### 3.2.3 Energia Fotovoltaica

Os painéis fotovoltaicos convertem a energia da radiação solar em energia elétrica através do efeito fotovoltaico. Este é realizado por intermédio das células fotovoltaicas formadas com materiais semicondutores, normalmente constituídos por silício. A célula fotovoltaica é composta por duas camadas de material semicondutor dopadas de forma diferente (*junção p-n*). A camada “*n*” contém excesso de eletrões, enquanto a camada “*p*” contém défice de eletrões – portanto, entre estas duas camadas existe uma diferença de potencial. Os eletrões da

Os sistemas energéticos para habitação autossustentável em clima Português: simulação e análise energética

---

camada “ $n$ ”, ao captarem a energia dos fotões, “saltam” a barreira de potencial, criando assim uma corrente contínua.

Estes sistemas produzem energia de corrente contínua (DC) que posteriormente será alterada, através de um inversor, para corrente alternada (AC) a 220 V, de modo a poder ser utilizada pelos diversos eletrodomésticos do edifício.

Atualmente, os tipos de células mais utilizadas são as de silício monocristalino e as de silício policristalino. As células de silício monocristalino são as que apresentam maior eficiência, porém são mais dispendiosas.

A instalação do sistema fotovoltaico em um edifício pode ser definida pelos dois seguintes grupos:

- Instalação isolada da rede elétrica (sistema autónomo)

O sistema autónomo pode ser aplicado em habitações remotas que não tenham ligação à rede elétrica. Este sistema necessita de um regulador de carga, baterias e um inversor. Por norma, é necessário um maior investimento, devido ao sobredimensionamento dos painéis solares e do elevado número de baterias. Para que o sistema autónomo tenha capacidade para alimentar as cargas, durante a noite ou durante os dias de baixa radiação, é recomendado o sobredimensionamento do sistema fotovoltaico e das baterias. Este tipo de sistema encontra-se ilustrado na *Figura 6 a*).

- Instalações ligadas à rede elétrica

Nos sistemas fotovoltaicos ligados à rede elétrica, a eletricidade produzida é entregue diretamente à rede elétrica. Este tipo de sistema não necessita de ser sobredimensionado nem de baterias, o que torna o sistema mais simples e mais económico.

Como descrito no *Capítulo 3.1*, o perfil do consumo atual nos edifícios é baseado no consumo da energia elétrica, devido a esse facto, torna-se cada vez mais necessário utilizar sistemas fotovoltaicos integrados nos edifícios de modo a alimentar os dispositivos e equipamentos domésticos. Este tipo de sistema pode ser observado na *Figura 6 b*).

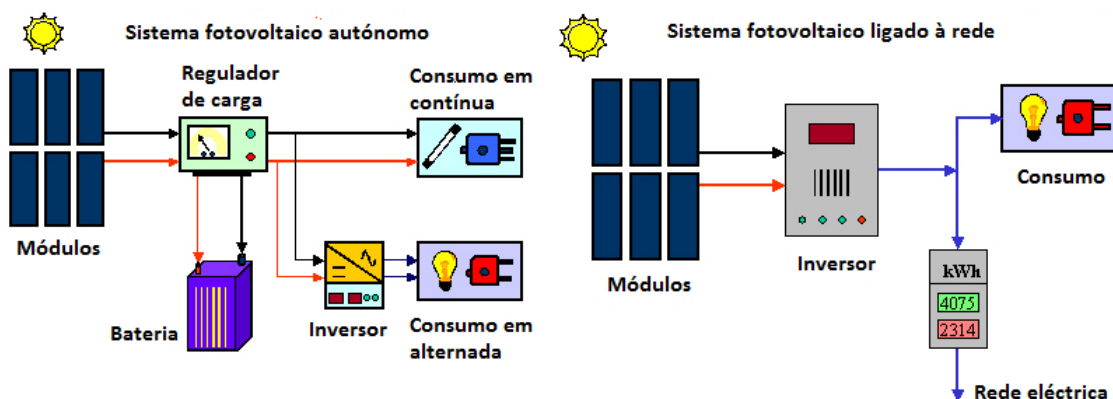


Figura 6 – Sistemas Solares Fotovoltaicos: a) Esquema sistema fotovoltaico autónomo, b) Esquema sistema fotovoltaico ligado à rede elétrica. (UNIA, 2012)

Em 2014, o governo português aprovou o DL nº153/2014, que estabelece o regime jurídico aplicável à produção de eletricidade para autoconsumo. Assim, é possível instalar uma unidade de produção para autoconsumo (UPAC) e vender o excedente à rede elétrica de serviço público (RESP).

A remuneração da energia proveniente das UPAC é determinada pelo artigo 24 do DL nº153/2014, no qual define a remuneração monetária pela energia que foi entregue à RESP através da seguinte equação:

$$R_{UPAC,m} = E_{fornecida,m} * OME_m * 0.9 \quad (6)$$

Onde,

$R_{UPAC,m}$  – Remuneração da eletricidade no mês (€);

$E_{fornecida,m}$  – Energia fornecida no mês (kWh);

$OME_m$  – Média aritmética simples dos preços de fecho do OME (Operador de Mercado Ibérico de Energia) para Portugal relativos ao mês (€/kWh).

As UPAC com potência instalada superior a 1,5 kW estão sujeitas ao pagamento de compensação mensal fixa nos primeiros 10 anos, definida, no artigo 25 do DL nº153/2014, pela seguinte equação:

$$C_{UPAC,m} = P_{UPAC} * V_{CIEG,t} * K_t \quad (7)$$

Onde,

$C_{UPAC,m}$  – Valor da compensação a pagar por cada kW de potência instalada (€);

$P_{UPAC}$  – Potência instalada (kW);

$V_{CIEG,t}$  – Valor que permite recuperar os CIEG (Custo de Interesse Económico Geral) apurado no ano t (€/kWh);

$K_t$  – Coeficiente de ponderação, entre 0% e 50%, tendo em consideração a representividade da potencia total registada das UPAC no Sistema Elétrico Nacional no ano t;

t – Ano de emissão do certificado de exploração da respetiva UPAC.

A tabela seguinte apresenta o valor  $V_{CIEG}$  mensal para o ano de 2015 fornecido pela ERSE (Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos) através da Diretiva nº15/2014.

Tabela 3 – Valor  $V_{CIEG,2015}$

Nível de tensão / Tipo de fornecimento	$V_{CIEG,2015}$ (€/kW)/mês
AT	2,617
MT	3,062
BTE	3,819
BTN > 20,7 kVA	3,308
BTN ≤ 20,7 kVA	5,780

O coeficiente de ponderação  $K_t$  assume os seguintes valores:

- $K_t=50\%$ , se o total acumulado de potência instalada das UPAC, no âmbito do regime de autoconsumo, exceda 3 % do total da potência instalada de centro electroprodutores do SEN;
- $K_t=30\%$ , se o total acumulado de potência instalada de UPAC, no âmbito do regime de produção de eletricidade em autoconsumo, se situe entre os 1% e 3% do total da potência instalada de centro electroprodutores do SEN;
- $K_t=0\%$ , se o total acumulado de potência instalada de UPAC, no âmbito do regime de autoconsumo, seja inferior a 1 % do total da potência instalada de centro electroprodutores do SEN.



### **3.3 Sistemas de climatização**

Os sistemas de climatização são muito importantes para o conforto no interior de uma habitação. Estes permitem criar condições de conforto térmico aos ocupantes quando os elementos construtivos já não são capazes de o fazer.

#### **3.3.1 Sistemas de emissão**

Os sistemas de emissão permitem criar condições de conforto no interior emitindo calor ou frio, podendo ou não fazer parte de um sistema de aquecimento central.

- Radiadores:

Este tipo de sistema emite calor por convecção ou radiação, normalmente é alimentado por um sistema de aquecimento central constituído por caldeiras, recuperadores de calor ou bombas de calor de alta temperatura.

- Ventiloconvectores:

Estes sistemas funcionam de modo semelhante ao ar condicionado no aquecimento e arrefecimento do ambiente, e são alimentados por água proveniente do aquecimento central. Os ventiloconvectores podem ser embutidos no teto, em parede ou chão.

- Ar condicionado:

Este sistema permite climatizar e controlar a humidade do ar interior, podem ser Split ou Multi-Split – se alimentar um, dois ou mais aparelhos emissores respetivamente.

- Piso radiante:

O piso radiante emite calor através do pavimento, que será distribuído, criando uma diferença de temperatura entre o piso e o teto. A temperatura será superior ao nível do piso do que no teto, que confere um maior conforto para os moradores. Este sistema pode ser elétrico ou hidráulico. O piso radiante elétrico consiste numa rede de cabos situada por baixo do pavimento da habitação, que é alimentada por energia elétrica. O piso radiante hidráulico consiste numa rede de tubos distribuídos por baixo do pavimento. Nesses tubos

circula água com uma temperatura entre os 35°C e os 45°C proveniente de uma caldeira, bomba de calor ou recuperador de calor.

### 3.3.2 Bombas de calor

O princípio de funcionamento de uma bomba de calor baseia-se no oposto do ciclo termodinâmico de Carnot, transporta energia térmica de uma fonte para o local de utilização, consumindo energia no processo.

Uma bomba de calor é composta por quatro componentes básicas: evaporador; compressor; condensador e válvula de expansão.

O funcionamento de uma bomba de calor, ilustrado na *Figura 7*, é o seguinte: o evaporador absorve o calor da fonte de térmica, depois transfere esse calor para o fluido de transporte (que o irá aquecer e evaporar); em seguida, o vapor entra no compressor (que irá aumentar a pressão e a temperatura do vapor); o vapor sobreaquecido entra no condensador (onde o calor é transferido e ao arrefecer irá condensar); depois o fluido a alta pressão entra na válvula de expansão (que reduz a pressão e consequente temperatura) e volta a entrar no evaporador.

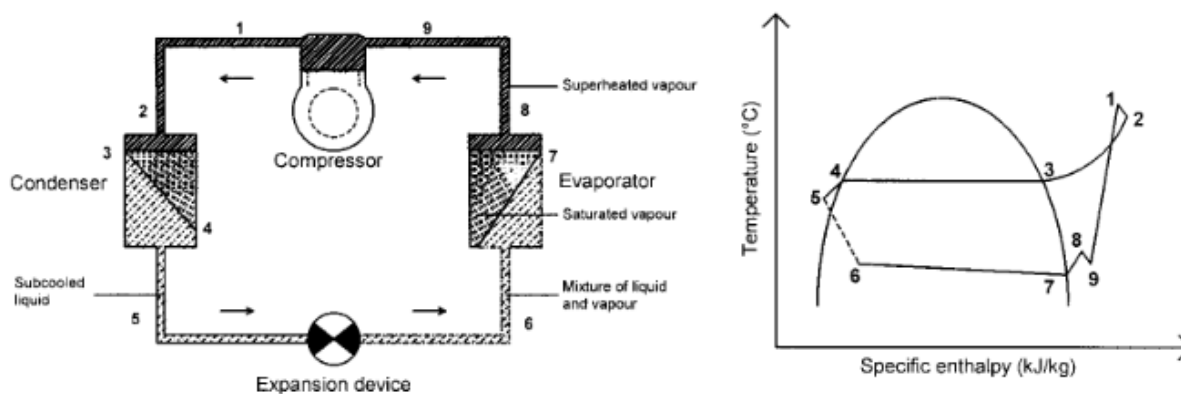


Figura 7 – Esquema do circuito de uma bomba de calor. (Swardt Meyer, 2001)

O rendimento de uma bomba de calor é caracterizado pelo coeficiente de desempenho (COP) e pelo rácio de eficiência energética (EER). O COP define a eficiência de aquecimento de uma bomba de calor, por outro lado, o EER define a eficiência de arrefecimento. Quanto maior o COP e o EER, maior será o rendimento da bomba de calor. Estes coeficientes consistem no quociente entre a capacidade de aquecimento/arrefecimento e a energia consumida pelo sistema, expressa nas seguintes equações.

$$COP = \frac{C_{aquecimento}}{P_{absorvida}} \quad EER = \frac{C_{arrefecimento}}{P_{absorvida}} \quad (8)$$

Onde,

$C_{aquecimento}$  – a capacidade de aquecimento da bomba de calor [W]

$C_{arrefecimento}$  – a capacidade de arrefecimento da bomba de calor [W]

$P_{absorvida}$  – é a potência consumida pela bomba de calor [W]

As bombas de calor caracterizam-se pelo tipo de fonte de calor e pela distribuição do fluido de climatização, (I. Sarbu, C. Sebarchievici, 2013). Na *Figura 8* estão ilustrados as formas de captação mais comuns das principais fontes de calor (ar, água e solo).

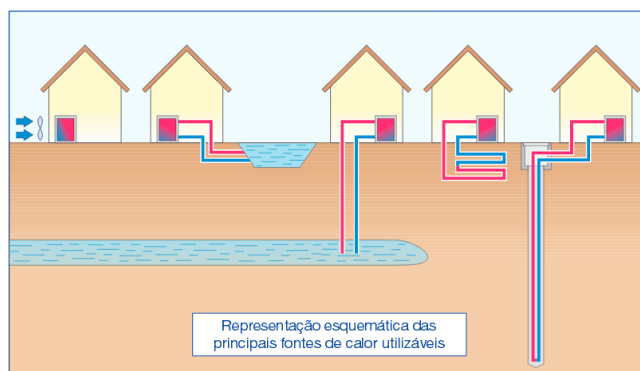


Figura 8 – Principais fontes de calor e formas de captação. (Calefi, 2009)

- Bomba de calor Ar-Ar

A bomba de calor Ar-Ar é a bomba de calor mais comum. Este sistema utiliza como fonte de calor o ar e climatiza o espaço através da emissão de ar climatizado. Este tipo de bombas de calor são mais fáceis de instalar, requerem menos espaço e apresentam menores custos de instalação.

- Bomba de calor Água-Ar

A bomba de calor Água-Ar efetua permuta de calor com a água, através de um fluido térmico, e utiliza o ar para aquecer ou arrefecer o espaço climatizado.

- Bomba de calor Água-Água

Este tipo de bomba de calor utiliza a água como fonte térmica e utiliza a água para climatizar o ambiente. Pode bombear a água diretamente da fonte para o circuito ou usar um fluido térmico para permuta de calor com a fonte.

- Bomba de calor Terra-Água

A bomba de calor Terra-Água, também conhecida com bomba de calor geotérmica, aproveita a elevada inércia térmica do solo. O solo apresenta temperaturas inferiores ao ar ambiente no verão e temperaturas superiores no inverno. Estas bombas utilizam um fluido térmico que efetua permuta de calor com o solo e climatizam o espaço através da água.

#### **4. Simulação dinâmica computacional – *EnergyPlus***

O *EnergyPlus* é um programa de simulação energética em edifícios, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (DOE). Foi desenvolvido em linguagem *FORTRAN 90*, com uma estrutura modular que facilita a adição de novas funcionalidades e a interação com outros programas, através da importação e exportação de dados.

No *EnergyPlus* destacam-se duas ferramentas essenciais para realizar uma simulação dinâmica de um edifício: o *IDF Editor* e o *EP-Launch*. No *IDF Editor*, encontram-se os vários parâmetros de simulação dispostos em classes de objetos. Cada classe subdivide-se em objetos, onde são introduzidos todos os dados referentes ao edifício que se pretende simular. O *IDF Editor* fornece ainda uma breve explicação dos dados a introduzir nos respetivos campos. A ferramenta *EP-Launch* permite selecionar o ficheiro IDF e o ficheiro climático pretendido. Esta também permite executar a simulação, visualizar os resultados, entre outros. As figuras seguintes apresentam o aspeto visual do *IDF Editor* e do *EP-Launch*.

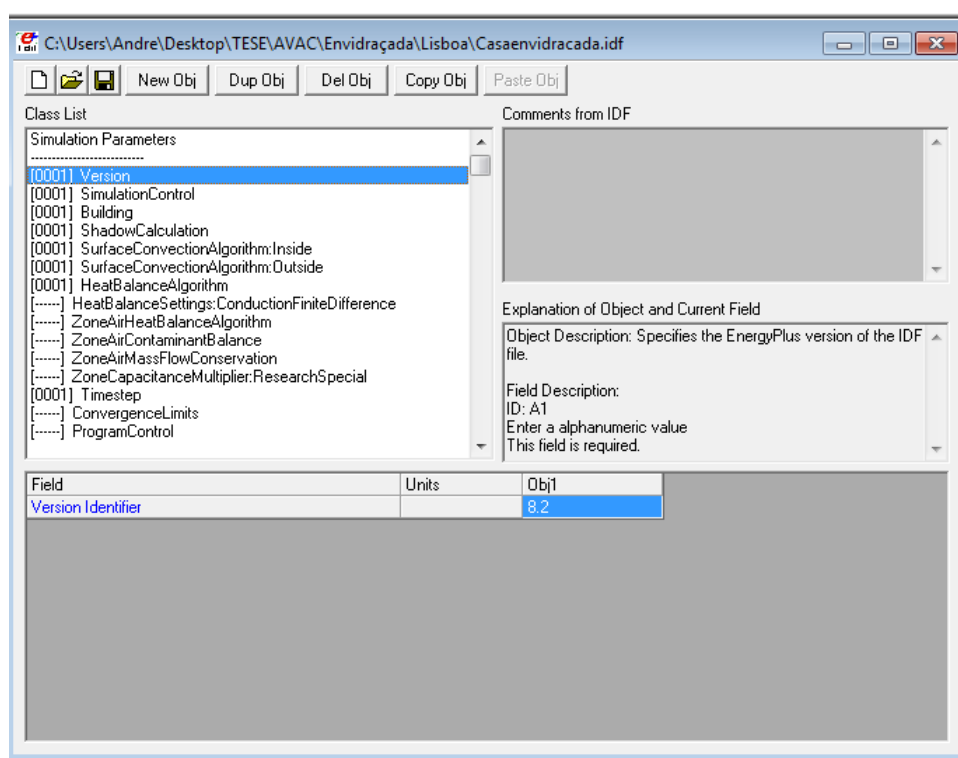


Figura 9 – Aspeto visual *IDF Editor*

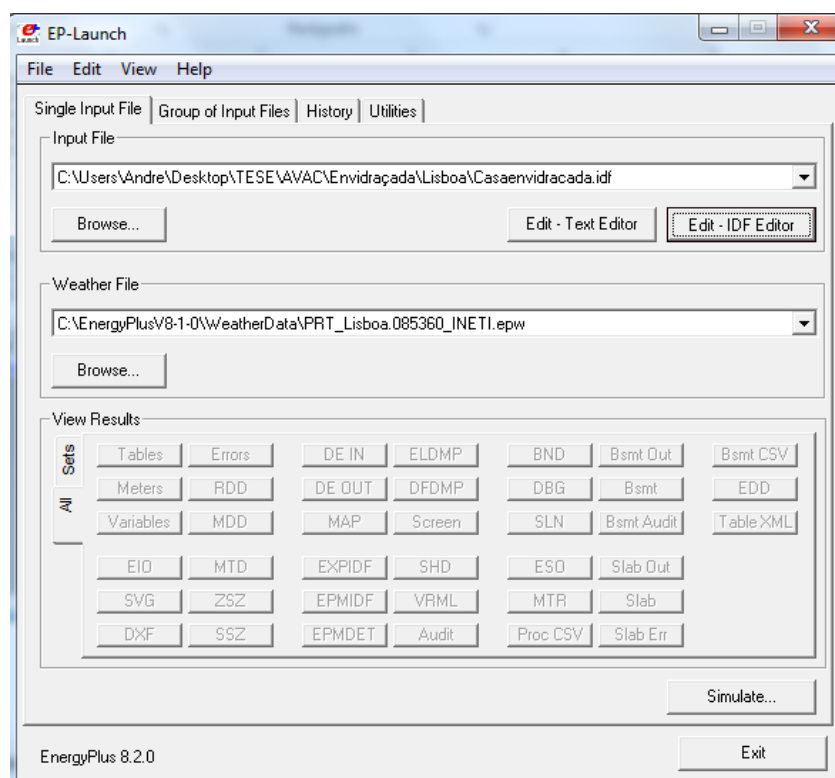


Figura 10 – Aspeto visual *EP-Launch*

A estrutura do *EnergyPlus* apresenta três componentes principais:

- **gestor de simulações**, que controla todo o processo de simulação;
- **módulo de simulação do balanço de calor e massa** – este módulo faz a simulação do balanço térmico do edifício, tendo em conta fatores como a transferência de calor por condução, transferência de calor por convecção, infiltrações, etc.;
- **módulo de simulação dos sistemas do edifício** – realiza a simulação do sistema AVAC, do sistema fotovoltaico e de outros sistemas energéticos.

O gestor de simulações faz a integração destes dois módulos, funcionando como *interface* na troca de dados. A estrutura do *EnergyPlus* com os seus respetivos módulos pode ser apreciada pela *Figura 11*.

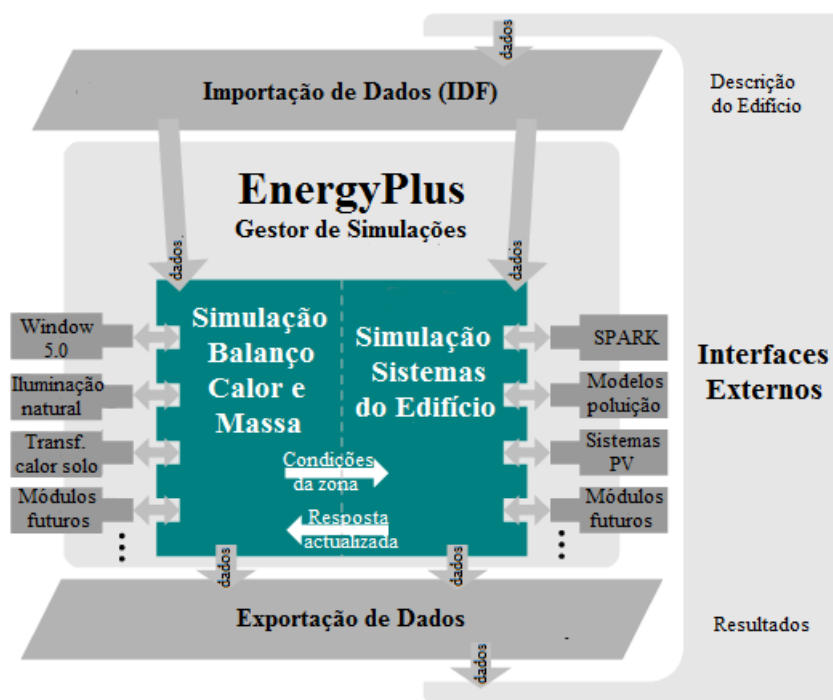


Figura 11 – Estrutura do EnergyPlus. (Crawley, 1999)

Para efetuar a simulação no *EnergyPlus* é necessário introduzir todos os dados que caracterizam o edifício em estudo, nomeadamente: a sua geometria, materiais constituintes, entre outros. Também é necessário fornecer o ficheiro climático da região pretendida, que contém a informação detalhada do meio ambiente local, designadamente a temperatura, humidade, radiação solar, entre outros.

Para simplificar a posterior análise dos dados, deve-se definir zonas térmicas, que são caracterizadas como locais submetidos ao mesmo controlo térmico. O *EnergyPlus* calcula o

balanço de calor e massa, assumindo que a massa de ar, em cada zona térmica, está perfeitamente misturada e com temperatura uniforme. Contudo, esta condição não tem grande influência nos resultados, apesar de não corresponder à realidade física.

O *EnergyPlus* realiza o cálculo do balanço térmico para as zonas delineadas, com base na seguinte equação:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{Nsl} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{Nsup} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{Nzonas} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sist} \quad (9)$$

Onde,

$C_z \frac{dT_z}{dt}$  – Energia armazenada no ar;

$\sum_{i=1}^{Nsl} \dot{Q}_i$  – Ganhos convectivos interiores;

$\sum_{i=1}^{Nsup} h_i A_i (T_{si} - T_z)$  – Transferência de calor convectiva nas superfícies das zonas;

$\sum_{i=1}^{Nzonas} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$  – Transferência de calor por mistura de ar entre zonas;

$\dot{Q}_{sist}$  – Carga térmica do sistema de ar;

$C_z = \rho_{ar} C_p C_T$  – Capacitância do ar;

$C_T$  – Multiplicador da capacidade de calor sensível (igual a 1 por defeito).

Se o parâmetro da capacitância do ar for ignorado, a carga térmica do sistema de ar em condições estacionárias será:

$$-\dot{Q}_{sist} = \sum_{i=1}^{Nsl} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{Nsup} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{Nzonas} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) \quad (10)$$

A carga térmica introduzida pelo sistema de ar numa zona,  $\dot{Q}_{sist}$ , supre as necessidades de aquecimento e arrefecimento nessa zona. Esta carga térmica pode ser exprimida através da diferença entre a entalpia do ar fornecido pelo sistema e a entalpia do ar que sai da zona, como mostra a seguinte equação:

$$\dot{Q}_{\text{sist}} = \dot{m}_{\text{sis}} C_p (T_{\text{sup}} - T_z) \quad (11)$$

Esta equação assume que a taxa do fluxo de ar administrado na zona é igual à taxa do fluxo de ar extraído da zona pelo sistema. Substituindo na equação (9) o termo  $\dot{Q}_{\text{sistema}}$  pela equação (11) tem-se:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{sup}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{\text{inf}} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{m}_{\text{sis}} C_p (T_{\text{sup}} - T_z) \quad (12)$$

O programa EnergyPlus calcula a energia armazenada na zona ( $\frac{dT_z}{dt}$ ) a cada *timestep*, através de uma aproximação de diferenças finitas de terceira ordem descrito na seguinte equação:

$$\left. \frac{dT_z}{dt} \right|_t \approx (\delta t)^{-1} \left( \frac{11}{6} T_z^t - 3 T_z^{t-\delta t} + \frac{3}{2} T_z^{t-2\delta t} - \frac{1}{3} T_z^{t-3\delta t} \right) + O(\delta t^3) \quad (13)$$

Substituindo a derivada da temperatura da equação (12) pela equação (13) e rearranjando a equação obtém-se a temperatura da zona:

$$T_z^t = \frac{\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{sup}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + - \left( \frac{C_z}{\delta} \right) \left( -3 T_z^{t-\delta t} + \frac{3}{2} T_z^{t-2\delta t} - \frac{1}{3} T_z^{t-3\delta t} \right)}{\left( \frac{11}{6} \right) \frac{C_z}{\delta t} + \sum_{i=1}^{N_{sup}} h_i A + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{\text{inf}} C_p + \dot{m}_{\text{sist}} C} \quad (14)$$

A metodologia utilizada pelo *EnergyPlus* consiste no procedimento *Previsão-Correção* a cada *timesep*. Através da equação (10), o *EnergyPlus* faz uma estimativa da carga térmica necessária para satisfazer as condições de temperatura de ar pretendidas na zona (*setpoint temperature*). Em seguida, o *EnergyPlus* faz a simulação da capacidade do sistema AVAC, para saber qual a carga térmica nesse momento. Por fim, usa a capacidade do sistema AVAC na equação (14) e calcula a temperatura da zona em estudo.



## 5. Caso de estudo

### 5.1 Arquitetura e materiais

Este estudo tem por base um edifício unifamiliar do tipo T2, com área total de 110 m<sup>2</sup>. Edifício desenvolvido no projeto *Passive-On* (Guilherme Graça, 2006). Para analisar a influência da envolvente no comportamento térmico deste edifício, foram estudadas duas envolventes distintas (Guilherme Graça, 2012), apresentadas na *Figura 12*.

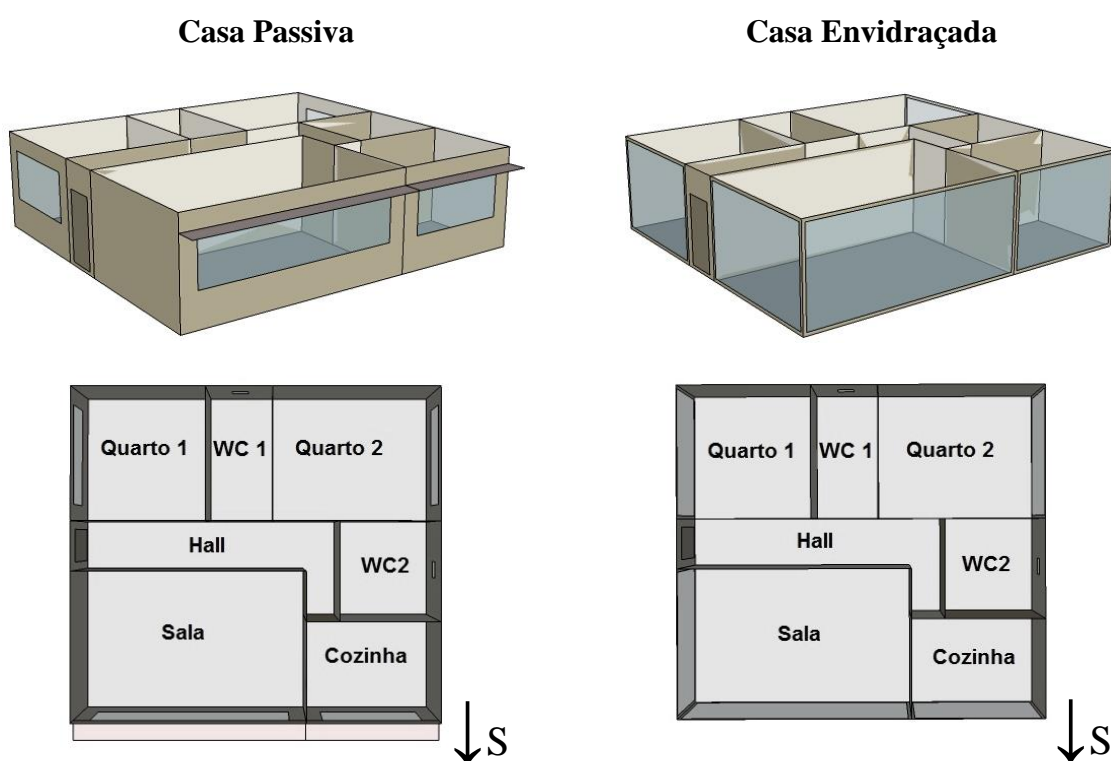


Figura 12 – Arquitetura e planta da casa passiva e da casa envidraçada. (Graça, 2006)

- Casa Passiva (CP)

Este modelo representa uma casa mais otimizada para o clima português. Esta casa está dotada de soluções construtivas passivas – dimensões otimizadas dos vãos envidraçados e palas de sombreamento para o controlo dos ganhos solares. Este modelo apresenta baixas necessidades de aquecimento e arrefecimento.

- Casa Envidraçada (CE)

Este modelo representa uma casa não otimizada para o clima Português, contém grandes áreas envidraçadas e não tem sistemas para controlar os ganhos solares. A casa envidraçada tende a ter menores necessidades de aquecimento, contudo elevadas necessidades de arrefecimento.

O rácio de área envidraçada pela área do edifício é cerca de 21% para a Casa Passiva, e cerca de 58% para a Casa Envidraçada. A tabela seguinte apresenta a área envidraçada de cada divisão, para ambos os modelos.

Tabela 4 – Área envidraçada por divisão

Zona	Área m <sup>2</sup>	Pd m	Volume m <sup>3</sup>	Área Envidraçada CP m <sup>2</sup>	Área Envidraçada CE m <sup>2</sup>
Hall	13.5	3	40.5	0.00	0.00
Sala	31.5	3	94.5	9.00	31.08
Cozinha	12.0	3	36.0	4.50	10.64
Quarto1	16.0	3	48.0	4.50	10.64
Quarto2	20.0	3	60.0	4.50	10.64
WC1	8.0	3	24.0	0.25	0.25
WC2	9.0	3	27.0	0.25	0.25
<b>Total</b>	<b>110.0</b>		<b>330.0</b>	<b>23.0</b>	<b>63.5</b>

Ambos os modelos partilham a mesma planta, têm a mesma área com pé direito de 3 m, ambas as coberturas são planas e contêm os mesmos materiais construtivos.

A *Tabela 5* apresenta os elementos que constituem a envolvente com os respetivos coeficientes de transmissão térmica.

Tabela 5 – Envolvente do edifício e coeficientes de transmissão térmica

Envolvente	Camada	Condutividade [W/(m.K)]	Espessura [m]	R [(m <sup>2</sup> .K)/ W]	U [W/(m <sup>2</sup> .K)]
Parede exterior	resistência superficial interior			0.13	0.32
	Estuque	0.5	0.01	0.02	
	Alvenaria	0.56	0.11	0.20	
	Poliesteren	0.04	0.1	2.50	
	Alvenaria	0.56	0.15	0.27	
	Estuque	0.5	0.01	0.02	
	resistência superficial exterior			0.04	
Parede interior	resistência superficial interior			0.13	2.01
	Estuque	0.5	0.01	0.02	
	Alvenaria	0.56	0.11	0.20	
	Estuque	0.5	0.01	0.02	
	resistência superficial interior			0.13	
Pavimento	resistência superficial interior			0.17	0.41
	Enrocamen	1.2	0.25	0.21	
	Poliesteren	0.04	0.08	2.00	
	HW Concret	1.72	0.15	0.09	
	resistência superficial exterior			0	
Cobertura	resistência superficial interior			0.1	0.23
	Estuque	0.5	0.01	0.02	
	LW Concret	0.57	0.2	0.35	
	Poliesteren	0.04	0.15	3.75	
	resistência superficial exterior			0.04	
Janelas	resistência superficial interior			0.13	1.62
	Vidro simpl	0.9	0.006	0.01	
	Ar	0.023	0.01	0.43	
	Vidro b. em	0.9	0.006	0.01	
	resistência superficial exterior			0.04	

## 5.2 Climatização e ventilação

Neste estudo foram analisados três sistemas de climatização no edifício, de modo a prever qual o sistema mais adequado:

- bomba de calor ar-ar, que irá climatizar as divisões através de ar climatizado;
- bomba de calor geotérmica, este sistema irá climatizar as divisões, através do piso radiante hidráulico, fornecendo água quente ou fria;

- sistema chiller mais caldeira elétrica, este sistema irá climatizar as divisões, através do piso radiante hidráulico, fornecendo água quente ou fria.

Os sistemas de climatização analisados foram dimensionados para climatizar as principais divisões do edifício, de modo a fornecer conforto térmico aos ocupantes – quartos, sala e cozinha.

Além do conforto térmico, a qualidade do ar no interior do edifício também afeta o conforto dos ocupantes. Foram calculados os requisitos de ar novo, através das *Tabelas 1.04 e 1.05* da portaria nº353-A do decreto de lei DL118/2013, com base no tipo de atividade dos ocupantes e carga de poluentes definidos:

- definiu-se que não existem atividades que envolvam emissão de poluentes,
- a taxa de metabolismo com base no tipo de atividade – atividade descanso (1 met) para a divisão da sala, atividade sedentária (1.2 met) para a cozinha e atividade sono (0.8 met) para os quartos.

A tabela seguinte mostra o requisito de ar novo para cada divisão.

Tabela 6 – Necessidades de ventilação de ar novo

Zona	Área m <sup>2</sup>	Pd m	Volume m <sup>3</sup>	Ocupação	Infil. RPH	Ventilação				
						Ar Novo m <sup>3</sup> /(h.ocupante)	Ar Novo m <sup>3</sup> /h	Ar Novo m <sup>3</sup> /(h.m <sup>2</sup> )	Ar Novo m <sup>3</sup> /h	Ar Novo m <sup>3</sup> /h
Hall	13.5	3	40.5	0	0.4					
Sala	31.5	3	94.5	3	0.4	20	60.0	3	94.5	94.5
Cozinha	12.0	3	36.0	1	0.4	24	24.0	3	36.0	36.0
Quarto1	16.0	3	48.0	2	0.4	16	32.0	3	48.0	48.0
Quarto2	20.0	3	60.0	2	0.4	16	32.0	3	60.0	60.0
WC1	8.0	3	24.0	0	0.4					
WC2	9.0	3	27.0	0	0.4					
<b>Total</b>	<b>110.0</b>		<b>330.0</b>							<b>238.5</b>

### 5.3 Produção de energia

O edifício está dotado de painéis solares fotovoltaicos ligados à rede elétrica e de painéis solares térmicos. Estes dois sistemas servem para suprir as necessidades elétricas do edifício e as necessidades de AQS A *Figura 13* mostra o esquema dos sistemas constituintes do edifício.

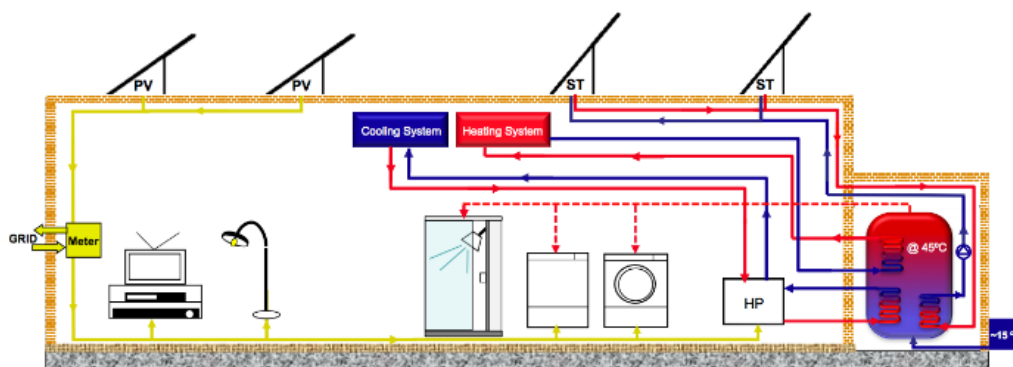


Figura 13 – Esquema dos sistemas constituintes do edifício. (Graça, 2012)

## 6. Simulação com o *EnergyPlus*

### 6.1 Modelação geométrica e zoneamento

A modelação geométrica do edifício em estudo foi elaborada no programa *Google SketchUp 8*. Através do *plug-in Legacy OpenStudio* (desenvolvido pelo DOE) foi gerado um ficheiro IDF (*Input Data File*) que permite exportar a informação geométrica do edifício para o *EnergyPlus*. Após o *input* do ficheiro IDF no *EnergyPlus*, foram definidos os materiais constituintes da envolvente do edifício.

É importante dividir o edifício em diferentes zonas térmicas, para tornar a simulação dinâmica do comportamento térmico de um edifício mais realista. Por norma, em cada zona térmica deverá incluir uma divisão ou divisões com características térmicas semelhantes. Como o edifício em estudo tem poucas divisões, optou-se por definir uma zona térmica para cada divisão.

### 6.2 Enquadramento climático do edifício

As condições climáticas da região, onde o edifício está inserido, influênciam o comportamento térmico e os sistemas energéticos desse edifício. Este trabalho enquadra os dois modelos referidos anteriormente, nas regiões de Portugal com diferentes condições climáticas – Lisboa, Bragança, Coimbra e Faro.

O *EnergyPlus* permite enquadrar o edifício nas condições climáticas de cada região, utilizando ficheiros climáticos “*epw*” como base de dados. Os ficheiros climáticos utilizados foram fornecidos pelo INETI (Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação), atual LNEG (Laboratório Nacional de Energia e Geologia) e pelo IEWC (*the International Wether for Energy Calculation*).

Devido há existência de trocas de calor entre o edifício e o solo, a temperatura do solo em contacto com o edifício será diferente da temperatura do solo contido no ficheiro climático. Para maior precisão da simulação dinâmica, foi necessário introduzir as temperaturas médias mensais do solo em contacto com o edifício, no campo *Site:GroundTemperature:BuildingSurface*. As temperaturas do solo em contacto com o edifício foram calculadas pela ferramenta *Slab* do *EnergyPlus*. Onde foi necessário introduzir as características do piso do edifício, as temperaturas mensais do interior do edifício e o ficheiro climático da região em estudo.

### 6.3 Infiltração e ventilação natural

Como referido no *Capítulo 5.2*, é importante existir renovação do ar interior num edifício, de modo a proporcionar conforto aos ocupantes. Essa renovação do ar pode ser obtida através de infiltrações, ventilação natural e/ou ventilação mecânica. As infiltrações são entradas involuntárias do ar exterior para o interior, causadas por fissuras nas janelas ou através dos elementos construtivos. A ventilação natural pode ser conseguida através de abertura das janelas e a ventilação mecânica é obtida através de ventiladores.

Nas simulações realizadas foram aplicadas infiltrações, através do objeto *ZoneInfiltration: DesignFlowRate*, com base nos requisitos de ar novo discutidos no *Capítulo 5.2*. No hall e casas de banho foi aplicada a taxa mínima de renovação horária (0,4 RPH), em consonância com decreto de lei DL 118/2013. Foi também introduzida ventilação natural, através do objeto *ZoneVentilation: DesignFlowRate*, onde foi definida uma ventilação natural de 4 RPH, sempre que a temperatura interior seja superior a 25 °C.

Como a ventilação natural é feita através da abertura das janelas, determinou-se que esta apenas poderia ser realizada quando existem ocupantes na habitação – o horário definido foi entre as 20:00h e as 8:00h.

## 6.4 Previsão das cargas térmicas

Para obter as necessidades de aquecimento e arrefecimento, recorreu-se ao objeto *ZoneHVAC: IdealLoadsAirSystem*, no qual, permite simular as cargas térmicas sem necessitar de modelar ao pormenor um sistema AVAC. Foram definidos os limites de temperatura no fornecimento de ar por este sistema – máximo de 50°C, para aquecimento, e mínimo de 13°C, para arrefecimento. Foi também necessário criar um termostato, através do objeto *ThermostatSetpoint: DualSetpoint*, para controlar a temperatura interior – foi definido um limite de temperatura interior de 20°C para o aquecimento e 25°C para o arrefecimento. Recorreu-se também ao objeto *ZoneControl: Thermostat*, para indicar as zonas sujeitas ao controlo da temperatura interior.

Para obter as cargas térmicas de cada zona, introduziu-se no campo *Output:Variable*, as variáveis *Zone Ideal Loads Zone Total Heating Rate* e *Zone Ideal Loads Zone Total Cooling*.

## 6.5 Sistemas de climatização

### 6.5.1 Sistema de emissão – Piso radiante

Para definir o piso radiante, recorreu-se ao objeto *ZoneHVAC: LowTemperatureRadiant: VariableFlow*, onde se evidência os seguintes parâmetros:

- diâmetro interior do tubo de 13 cm;
- comprimento do tubo 400 m;
- definiu-se a temperatura média do ambiente para o controlo da temperatura;
- caudal máximo de água de 0,0013 m<sup>3</sup>/s;
- *setpoints* para o controlo da temperatura interior, 20 °C para o aquecimento e 25 °C para o arrefecimento.

Através do objeto *Construction: InternalSource*, definiu-se a localização dos tubos hidráulicos (após a camada de betão) e o espaçamento dos tubos (150 cm).

### 6.5.2 Bomba de calor ar-ar

A definição do sistema bomba de calor ar-ar foi feita através do objeto *HVACTemplate: Zone:PTHP*, onde foram introduzidos vários parâmetros, destacando:

- termóstato, previamente criado pelo objeto *HVACTemplate: Thermostat*, no qual foram definidos os *setpoints* da temperatura interior de aquecimento (20°C) e de arrefecimento (25°C);
- caudal de ar exterior 0,00944 m<sup>3</sup>/s por ocupante, valor de referência utilizado pelo *Energyplus*;
- eficiência de aquecimento (COP=3,77) e eficiência de arrefecimento (EER=3,2) obtidos no site do fornecedor;
- limites de temperatura no fornecimento de ar por este sistema, máximo de 50°C para aquecimento e mínimo de 13°C para arrefecimento.

Para obter os consumos energéticos deste sistema, foram definidas para *output* as variáveis *Heating Coil Electric Power*, *Cooling Coil Electric Power* e *Facility Total HVAC Electric Demand Power*.

### 6.5.3 Bomba de calor geotérmica

Na definição deste sistema optou-se por utilizar uma bomba de calor água-água. Esta bomba de calor utiliza como fonte de calor o solo e climatiza o espaço através do piso radiante. Foi necessário criar o objeto *HeatPump: WaterToWater: EquationFit:Heating* para o aquecimento e o objeto *HeatPump: WaterToWater: EquationFit:Cooling* para o arrefecimento, onde se evidenciam as seguintes características:

- eficiência de aquecimento (COP=5,3) e eficiência de arrefecimento (EER=6,3) obtidos no site do fornecedor;
- caudal de água fornecido pela bomba de calor 0,004 m<sup>3</sup>/s;
- caudal de água da fonte de calor 0,0008 m<sup>3</sup>/s.



Definiu-se também a fonte de calor onde o sistema faz a troca de calor, através do objeto *GroundHeatExchanger:Vertical*, onde definiu-se uma profundidade de 70m e a temperatura do solo de 13°C a essa profundidade.

Para obter os consumos energéticos deste sistema, foram definidas para *output* as variáveis *Zone Radiant HVAC Heating Rate*, *Zone Radiant HVAC Cooling Rate*, *Water to Water Heat Pump Electric Power* e *Facility Total HVAC Electric Demand Power*.

#### 6.5.4 Chiller e caldeira

Este sistema utiliza um *chiller* ar-água para o arrefecimento e uma caldeira elétrica para o aquecimento, através do piso radiante. Através do objeto *Chiller:ConstantCOP* definiu-se um *chiller* com COP nominal de 2,67 (obtido no site do fornecedor), com um caudal de água arrefecida de 0,0004 m<sup>3</sup>/s e o condensador a ar arrefecido.

Para definir a caldeira elétrica, recorreu-se o objeto *Boiler:HotWater*, onde foram introduzidos seguintes parâmetros: tipo de alimentação (eletricidade através do parâmetro *Fuel Type: Electricity*); capacidade de aquecimento (adequada a cada região); e caudal de água fornecida pela caldeira de 0,0004 m<sup>3</sup>/s.

Para obter os consumos energéticos deste sistema, foram definidas para *output* as variáveis *Boiler Electric Power*, *Chiller Electric Power* e *Facility Total HVAC Electric Demand Power*.

#### 6.6 Água quente sanitária (AQS)

Considerou-se um consumo de AQS de 40L por dia/ocupante. O consumo de AQS foi definido recorrendo ao objeto *WaterUse:Equipment*, onde foram inseridos os seguintes parâmetros: um fluxo de água (0.0000019 m<sup>3</sup>/s); temperatura da água para uso (40°C); temperatura da água do sistema (43°C) e a temperatura da água fornecida pela rede (15°C). A temperatura da água do sistema é superior à temperatura da água para uso, para compensar as perdas de calor na distribuição.

Para obter os consumos de água foi definida para *output* a variável *WaterUseEquipment HeatingEnergy*.

## 7. Resultados

### 7.1 Simulação em regime livre

As simulações sem aquecimento e arrefecimento mecânicos permitem uma avaliação simples dos níveis de conforto térmico no edifício. Nas simulações em regime livre, foram escolhidos dois períodos do ano: o período frio, compreendido entre 1 de Novembro e 15 de Abril; e o período quente, entre 16 de Abril e 31 de Outubro. Através destas simulações obtiveram-se as frequências das temperaturas interiores, ilustradas nas figuras seguintes, para as diferentes regiões.

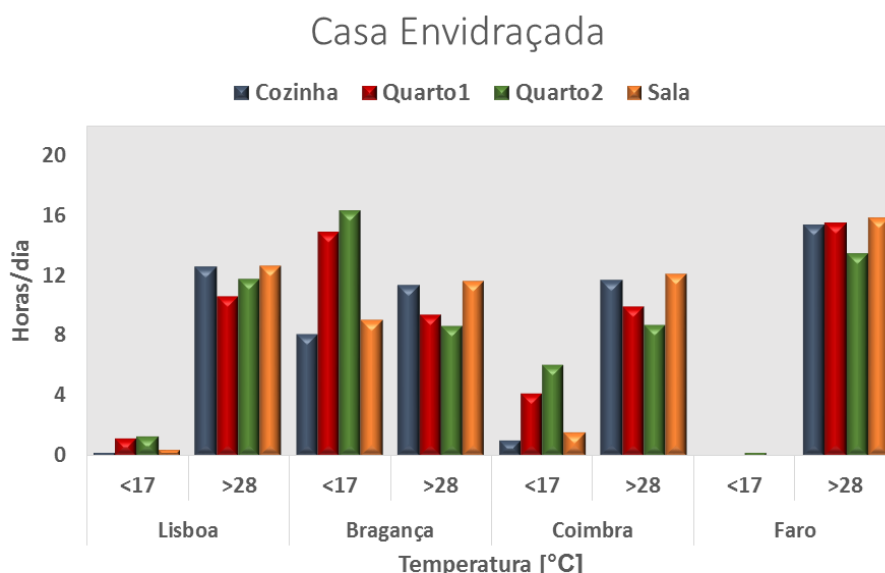


Figura 14 – Frequências da temperatura interior para a casa envidraçada em cada região.

No período quente, a casa envidraçada (CE) apresenta um elevado número de horas diárias acima dos 28°C, particularmente nas divisões da sala e da cozinha. Faro é a região onde a CE apresenta maior frequência de horas acima dos 28°C, cerca de 16h por dia.

No período frio, a CE, apresenta um número residual de horas diárias abaixo dos 17°C para as regiões de Lisboa e Faro. Em Bragança, a CE apresenta um elevado número de horas diárias abaixo dos 17°C, com destaque para o quarto 2, que ultrapassa as 16h por dia abaixo dos 17°C.

Estes resultados são expectáveis, dado que a casa envidraçada possui elevados ganhos solares, devido às grandes áreas envidraçadas, principalmente nas fachadas da sala e da cozinha.

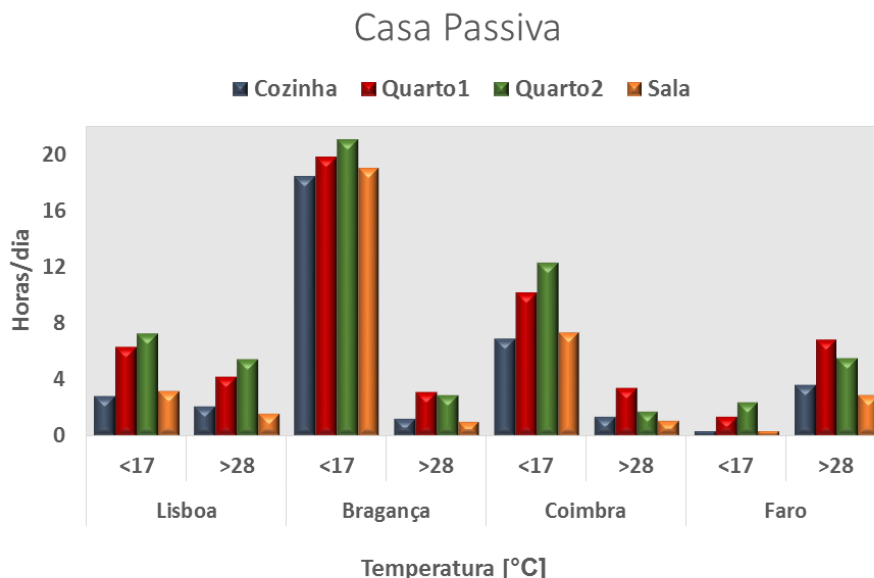


Figura 15 – Frequências da temperatura interior para a casa passiva em cada região.

No período quente, a casa passiva (CP) apresenta um baixo número de horas diárias acima dos 28°C, bastante inferior ao número de horas diárias constatadas na casa envidraçada (CE). Em geral, os quartos são as divisões que apresentam maior número de horas diárias acima dos 28°C. Faro é a região onde a CP apresenta maior frequência de horas acima dos 28°C, cerca de 7h por dia.

No período frio, a CP apresenta mais horas por dia abaixo dos 17°C que a CE. Bragança é a região que apresenta maior frequência de horas por dia abaixo dos 17°C – ultrapassa as 18h por dia.

Estes resultados são esperáveis, visto que a CP possui fachadas com menores áreas envidraçadas e palas de proteção solar nas fachadas da sala e da cozinha. Ao contrário da CE, a CP não apresenta um ganho solar excessivo no verão, contudo tem menor ganho solar no inverno, embora pouco significativo.

A variação da temperatura interior num dia típico de janeiro, referente à estação do inverno, e num dia típico de julho, referente à estação de verão, podem ser observadas na *Figura 16* e na *Figura 17*, respetivamente:

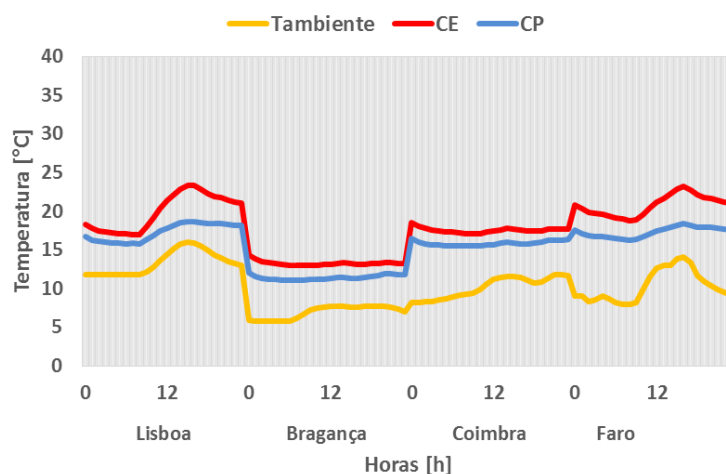


Figura 16 – Temperatura interior para a casa envidraçada e casa passiva num dia típico em janeiro para cada região.

Num dia típico de inverno, Lisboa apresenta uma variação da temperatura ambiente entre 11,8°C – 16,1°C, a temperatura interior na CP varia entre 15,8°C – 18,7°C e a temperatura interior na CE varia entre 16,9°C – 23,3°C.

Em Bragança, a temperatura ambiente varia entre 5,8°C – 7,8°C, a temperatura interior na CP varia entre 15,8°C – 18,7°C e a temperatura interior na CE varia entre 11,1°C – 12°C.

Coimbra apresenta uma variação da temperatura ambiente entre 8,2°C – 11,9°C, a temperatura interior na CP varia entre 15,5°C – 16,3°C e a temperatura interior na CE varia entre 17,1°C – 18,5°C.

Na região de Faro, a temperatura ambiente varia entre 8°C – 14,2°C, a temperatura interior na CP varia entre 16,3°C – 18,4°C e a temperatura interior na CE varia entre 18,8°C – 23,2°C.

Ambas as casas beneficiam de temperaturas interiores superiores à temperatura ambiente. A CP apresenta baixa amplitude das temperaturas interiores entre o dia e a noite em todas as regiões. Por outro lado, a CE apresenta temperaturas interiores superiores e maior amplitude das temperaturas entre o dia e a noite.

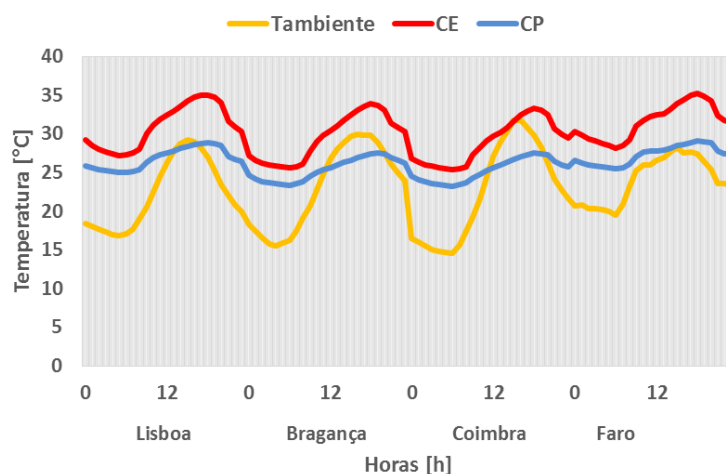


Figura 17 – Temperatura interior para a casa envidraçada e casa passiva num dia típico em julho para cada região.

Num dia típico de verão, Lisboa apresenta uma variação da temperatura ambiente entre 16,9°C – 29,1°C, a temperatura interior na CP varia entre 25,1°C – 28,8°C e a temperatura interior na CE varia entre 27,2°C – 35,1°C.

Em Bragança, a temperatura ambiente varia entre 15,8°C – 29,9°C, a temperatura interior na CP varia entre 23,4°C – 27,5°C e a temperatura interior na CE varia entre 25,6°C – 32,2°C.

Coimbra apresenta uma variação da temperatura ambiente entre 14,5°C – 31,8°C, a temperatura interior na CP varia entre 24,1°C – 27,5°C e a temperatura interior na CE varia entre 25,4°C – 33,4°C.

Faro apresenta uma variação da temperatura ambiente entre 19,5°C – 28,3°C, a temperatura interior na CP varia entre 25,5°C – 29,1°C e a temperatura interior na CE varia entre 28,2°C – 35,3°C.

Em geral, a casa passiva (CP) apresenta temperaturas menores no verão e menor amplitude da temperatura interior, cerca de 3°C a 4°C entre o dia e a noite. Nas horas de maior calor, a temperatura interior encontra-se mais baixa que a temperatura ambiente. Este fenómeno tem maior relevância em Bragança e em Coimbra. A casa envidraçada (CE) exhibe temperaturas superiores à temperatura ambiente ao longo de todo o dia e apresenta maior amplitude de temperatura interior, 6°C a 8°C entre o dia e a noite.

## 7.2 Influência da orientação no edifício

Para estudar a sensibilidade das necessidades de aquecimento e arrefecimento com a variação da orientação do edifício, foram realizadas simulações das necessidades de climatização modificando as orientações das casas em estudo nas várias regiões.

Os gráficos seguintes mostram as necessidades de climatização para cada orientação. Evidenciam também, a melhor orientação para a casa passiva e a pior orientação para a casa envidraçada.

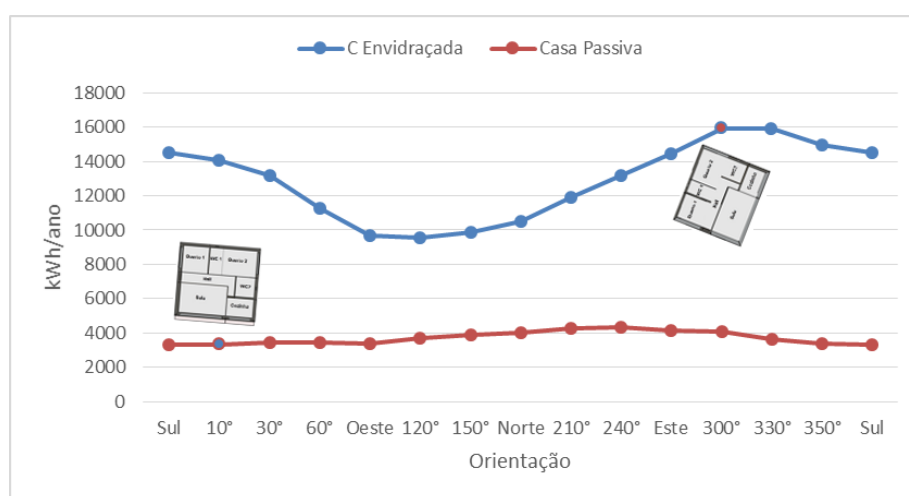


Figura 18 – Necessidades de climatização para diferentes orientações da fachada, Lisboa.

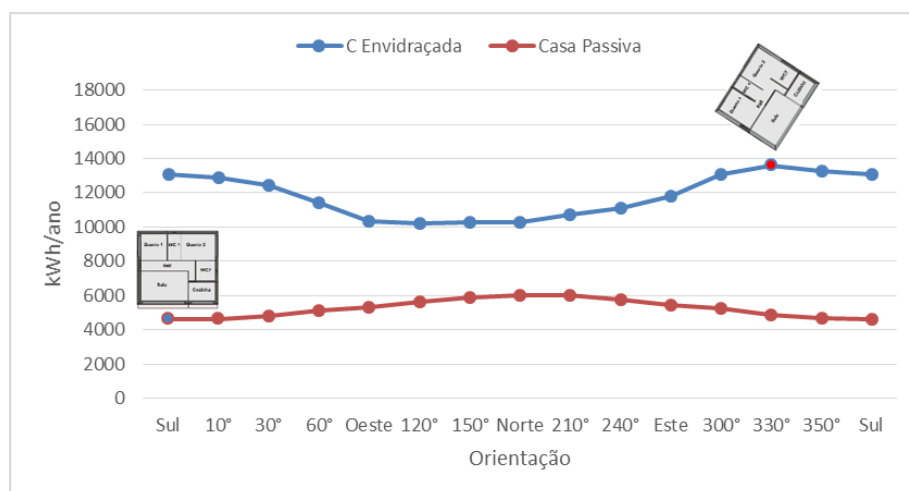


Figura 19 – Necessidades de climatização para diferentes orientações da fachada, Bragança.

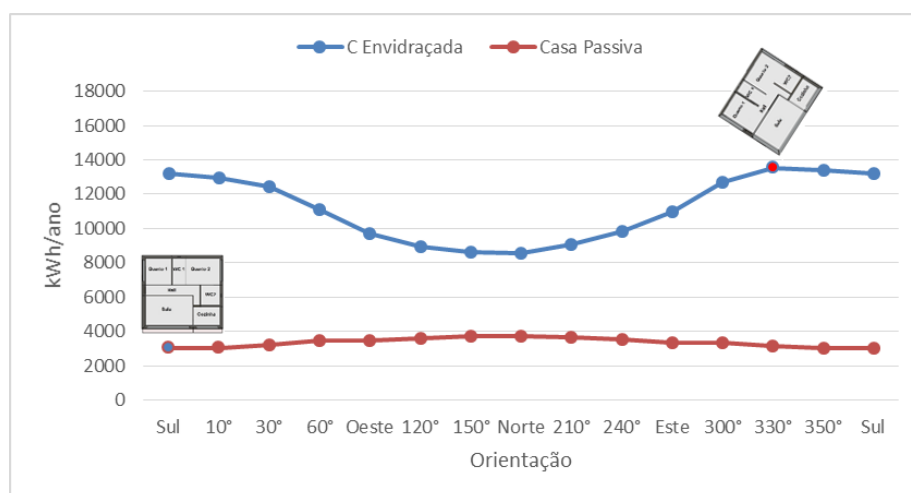


Figura 20 – Necessidades de climatização para diferentes orientações da fachada, Coimbra.

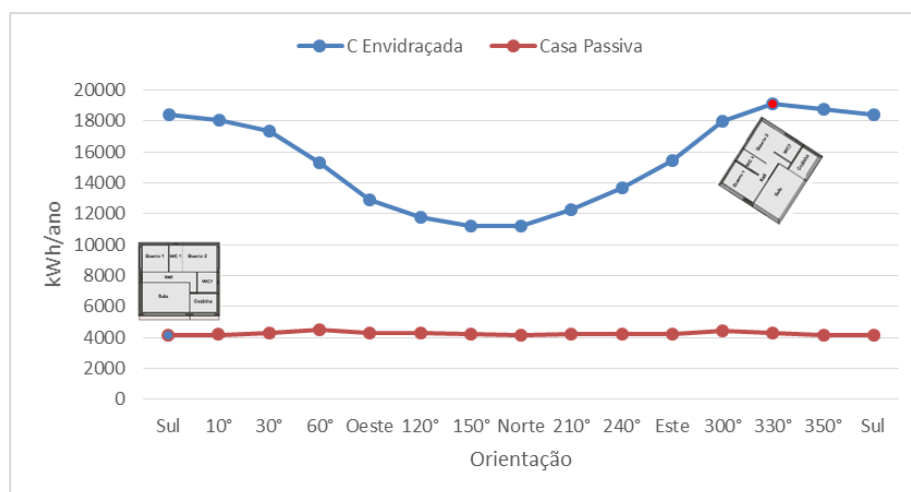


Figura 21 – Necessidades de climatização para diferentes orientações da fachada, Faro.

Como previsto, a casa passiva (CP) apresenta pouca variação na necessidade de climatização com a mudança da orientação. Esta característica deve-se ao facto da CP possuir um bom controlo nos ganhos solares e bom isolamento térmico.

A melhor orientação para a CP é a fachada principal virada a sul, com exceção na região de Lisboa, na qual a melhor orientação é a fachada principal virada 10° para oeste (no entanto pouco significativo em relação a sul).

Faro destaca-se, pela particularidade da fachada principal virada a norte, apresentar necessidades semelhantes de climatização em relação à fachada principal virada a sul – esta

particularidade, deve-se ao facto de Faro apresentar maior período de exposição solar e menor flutuação da temperatura ambiente durante o dia. Apesar de apresentarem necessidades de climatização semelhantes, a CP com a fachada principal virada a sul terá maiores necessidades de arrefecimento e menores necessidades de aquecimento em relação com a orientação a norte.

A casa envidraçada (CE) apresenta grande variação na necessidade de climatização com a mudança da sua orientação. Esta característica, deve-se pelo facto da CE possuir fraco controlo dos ganhos solares e a ventilação natural é insuficiente para remover os ganhos solares, excessivos durante o período de arrefecimento.

A pior orientação, na qual a CE apresenta maior necessidade de climatização, é a fachada principal virada a 330° (ESE – és-sudeste). Esta maior necessidade de climatização é justificada pelo aumento na necessidade de arrefecimento, pois as duas fachadas com maior área envidraçada receberão maior radiação solar. A fachada principal (*fachada sala – cozinha*) terá ganhos solares na parte da manhã e a *fachada sala – quarto1* terá ganhos solares da parte da tarde.

Para analisar a influência da geometria e orientação do edifício nas necessidades de climatização, definiu-se a pior orientação (330°) para a CE e a melhor orientação (sul) para a CP. As necessidades de climatização estão apresentadas nos gráficos da *Figura 22*.

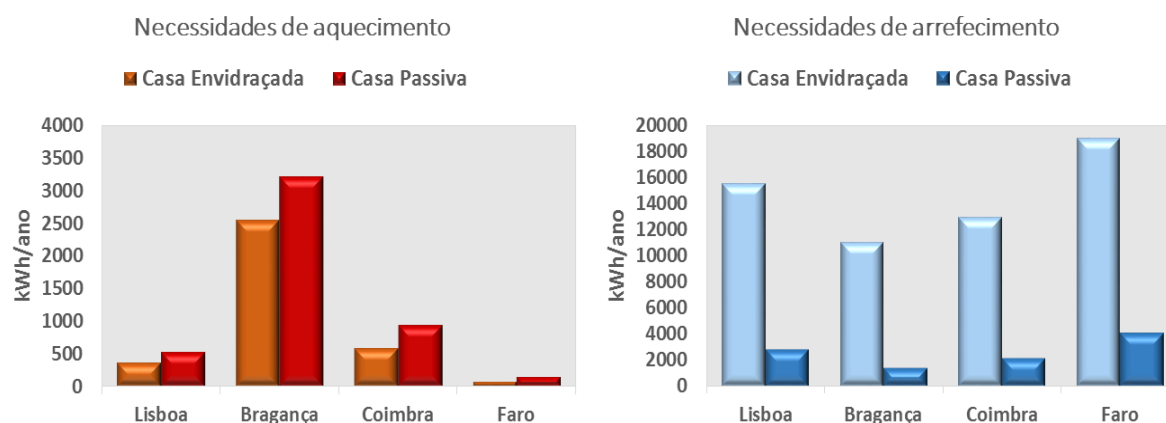


Figura 22 – Necessidades de aquecimento e arrefecimento.

Analisando os gráficos da *Figura 22*, verifica-se que não existe grande variação das necessidades de aquecimento entre as duas casas. No entanto, a CP apresenta necessidades de arrefecimento entre 79% e 87% inferiores às necessidades de arrefecimento da CE. Os valores das necessidades de aquecimento e de arrefecimento estão apresentados na *Tabela 7*.



Tabela 7- Necessidades de aquecimento e arrefecimento

Região	Casa Envidraçada (pior orientação)		Casa Passiva (melhor orientação)	
	Necessidade aquecimento kWh/ano	Necessidade arrefecimento kWh/ano	Necessidade aquecimento kWh/ano	Necessidade arrefecimento kWh/ano
Lisboa	371	15568	524	2805
Bragança	2556	11058	3225	1410
Coimbra	589	12947	938	2111
Faro	72	19038	144	4003

### 7.3 Consumo energético dos eletrodomésticos e iluminação

Os consumos elétricos dos eletrodomésticos, aplicados neste estudo, são baseadas no projeto *Passive-On* (Carrilho Graça, 2006) e no estudo publicado pelo ministério português da economia em 2004 (Eficiência energética em equipamentos e sistemas elétricos no sector residencial).

Foram analisados dois perfis de consumo elétrico nos eletrodomésticos: um perfil de consumo denominado “*Família Típica*”, que representa uma família na qual a compra de eletrodomésticos não foi baseada na eficiência energética; e um segundo perfil de consumo designado de “*Família Ecológica*”, que representa uma família com maior sensibilidade na eficiência energética, possuindo eletrodomésticos mais eficientes. Os dois perfis analisados de consumo elétrico nos eletrodomésticos encontram-se apresentados na seguinte tabela:

Tabela 8- Consumo energético dos eletrodomésticos

Equipamento	Família Típica kWh/ano	Classe	Família Ecológica kWh/ano	Classe
Computador	200	-	95	-
AudioVisual	335	-	220	-
Combinado	380	C	140	A
Arca congeladora	625	D	225	A
Máq. Lavar roupa	240	G	36	A
Máq. Lavar Louça	396	G	53	A
Forno eléctrico	306	-	250	-
<b>Total</b>	<b>2482</b>		<b>1019</b>	

Foram também definidos dois perfis de consumo na iluminação. O edifício, no perfil de consumo da “*Família Típica*”, utiliza lâmpadas de halogéneo, atualmente a iluminação menos eficiente. No perfil de consumo da “*Família Ecológica*”, a iluminação do edifício é constituída por lâmpadas LED, atualmente a iluminação mais eficiente.

Os cálculos dos requisitos de iluminação em cada divisão dos edifícios são baseados na norma europeia EN 12464-1. Com base num perfil diário de utilização, foram também calculados os consumos anuais de eletricidade para a “*Família Típica*” e para a “*Família Ecológica*”, apresentados na tabela seguinte.

Tabela 9- Consumo energético na iluminação

		Requisitos		Família Típica			Família Ecológica		
Zona	Área m <sup>2</sup>	EN 12464-1 LUX	Fluxo Luminoso Lm	Potência W	Horas h/dia	Consumo kWh/ano	Potência W	Horas h/dia	Consumo kWh/ano
Hall	13.5	100	1350	79	0.2	5.8	17	0.2	0.4
Sala	31.5	200	6300	371	2	270.5	79	2	197.5
Cozinha	12.0	500	6000	353	1	128.8	75	1	47.0
Quarto1	16.0	300	4800	282	0.5	51.5	60	0.5	9.4
Quarto2	20.0	300	6000	353	0.5	64.4	75	0.5	11.8
WC1	8.0	200	1600	94	0.2	6.9	20	0.2	0.5
WC2	9.0	200	1800	106	0.2	7.7	23	0.2	0.6
<b>Total</b>	<b>110.0</b>			<b>1638</b>		<b>536</b>	<b>348</b>		<b>267</b>

A “*Família Típica*” apresenta um consumo energético de 3018 kWh/ano com os eletrodomésticos e iluminação. Por outro lado, uma “*Família Ecológica*” tem um consumo energético de 1286 kWh/ano – conseguindo assim, economizar 57% de eletricidade nos eletrodomésticos e na iluminação.

#### 7.4 Consumo energético na climatização

As simulações das necessidades energéticas para a climatização foram realizadas para a pior orientação da casa envidraçada (330°) e para a melhor orientação da casa passiva (sul). As tabelas seguintes apresentam os consumos energéticos da climatização para cada sistema de climatização, onde estão também incluídos os consumos energéticos das bombas de água e/ou da ventilação.

Tabela 10- Consumo energético – Bomba de calor ar-ar

Região	Casa Envidraçada			Casa Passiva		
	Consumo aquecimento kWh/ano	Consumo arrefecimento kWh/ano	Consumo total AVAC kWh/ano	Consumo aquecimento kWh/ano	Consumo arrefecimento kWh/ano	Consumo total AVAC kWh/ano
Lisboa	64	2821	2954	217	583	818
Bragança	804	2163	3396	1124	356	1900
Coimbra	161	2451	2685	368	457	878
Faro	11	3140	3225	59	769	849

A casa envidraçada (CE), equipada com o sistema bomba de calor ar-ar, apresenta uma variação máxima de 21% do consumo energético na climatização, para as diferentes regiões. Coimbra é a região que apresenta menor consumo energético (2685 kWh/ano), e Bragança é a região com maior consumo energético (3395 kWh/ano). Como esperado, a casa passiva (CP) apresenta menor consumo energético na climatização que a casa envidraçada – a poupança energética chega a ser superior a 70% nas regiões de Lisboa e Faro. A região na qual a CP tem menor consumo energético na climatização é Lisboa (818 kWh/ano); no lado oposto, está Bragança com consumo energético de 1900 kWh/ano, devido a maior consumo no aquecimento.

Tabela 11- Consumo energético – Bomba de calor geotérmica

Região	Casa Envidraçada			Casa Passiva		
	Consumo aquecimento kWh/ano	Consumo arrefecimento kWh/ano	Consumo total AVAC kWh/ano	Consumo aquecimento kWh/ano	Consumo arrefecimento kWh/ano	Consumo total AVAC kWh/ano
Lisboa	272	2932	3548	433	760	1496
Bragança	1339	2474	4300	1436	500	2412
Coimbra	477	2484	3312	623	575	1509
Faro	69	3131	3524	182	887	1337

A CE equipada com o sistema bomba de calor geotérmica não apresenta grande variação do consumo energético (variação máxima de 23%) na climatização para as diferentes regiões. Coimbra é a região que apresenta menor consumo energético (3312 kWh/ano), por outro lado, Bragança é a região com maior consumo energético (4300 kWh/ano). A CP apresenta menor consumo energético na climatização comparativamente com a casa envidraçada, com destaque na região de Faro onde a poupança energética é superior a 60%. Faro é a região na qual a CP apresenta menor consumo energético na climatização (1337 kWh/ano), por outro lado, está Bragança com maior consumo energético (2412 kWh/ano) devido a um maior consumo no aquecimento.

Tabela 12- Consumo energético – Chiller e caldeira

Região	Casa Envidraçada			Casa Passiva		
	Consumo aquecimento kWh/ano	Consumo arrefecimento kWh/ano	Consumo total AVAC kWh/ano	Consumo aquecimento kWh/ano	Consumo arrefecimento kWh/ano	Consumo total AVAC kWh/ano
Lisboa	1027	5648	7033	1477	1367	3031
Bragança	4818	4875	10175	4844	921	6099
Coimbra	1689	4931	6978	2081	1052	3346
Faro	318	6008	6664	617	1599	2377

Analisando a *Tabela 12*, verifica-se que existe um agravamento no consumo energético na climatização, principalmente no consumo energético para o aquecimento do ambiente.

No caso da CE, Faro é a região que apresenta menor consumo energético na climatização (6664 kWh/ano) e Bragança é a região com maior consumo energético (10175 kWh/ano) devido à maior necessidade de aquecimento. A CP apresenta menor consumo energético na climatização comparativamente à CE, com destaque na região de Faro – onde a poupança energética é superior a 60%. Faro é a região com menor consumo energético na climatização (2377 kWh/ano), no lado oposto, está Bragança com maior consumo energético (6099 kWh/ano).

Os gráficos *Figuras 23 e 24* ilustram o consumo energético de cada sistema de climatização para a casa envidraçada (CE) e a casa passiva (CP) respetivamente.

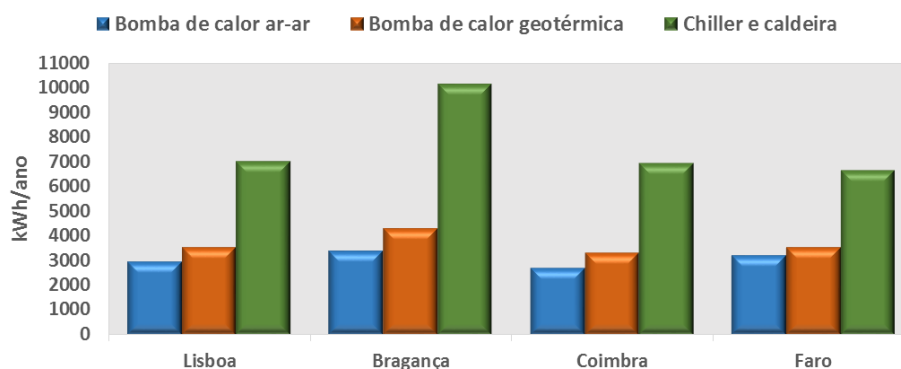


Figura 23 – Consumo energético na climatização: Casa envidraçada.

Na CE verifica-se, para todas as regiões, que o sistema com menor consumo energético é o sistema bomba de calor ar-ar. Optar pelo sistema bomba de calor ar-ar pode levar a poupanças significativas na eletricidade, até 67%, relativamente ao sistema chiller e caldeira.

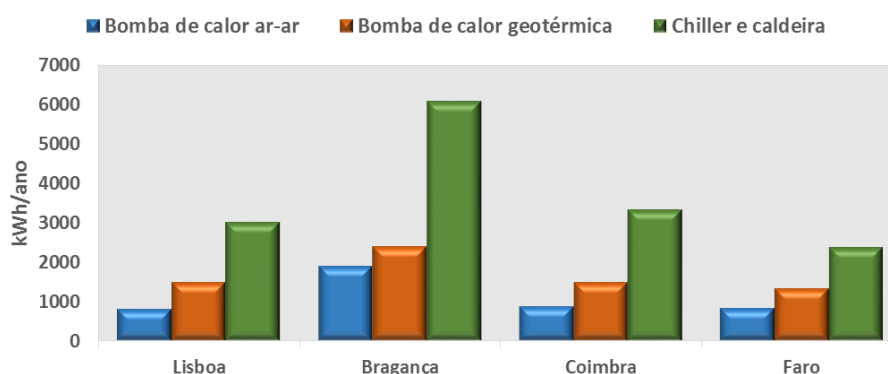


Figura 24 – Consumo energético na climatização: Casa passiva.

Na CP verifica-se, para todas as regiões, que o sistema com menor consumo energético é o sistema bomba de calor ar-ar. Optar pelo sistema bomba de calor ar-ar pode levar a poupanças significativas na eletricidade, até 74%, relativamente ao sistema chiller e caldeira.

Apesar da bomba de calor geotérmica apresentar um COP e EER superior ao da bomba de calor ar-ar, a eficiência real é menor. Esta menor eficiência deve-se à energia consumida pelas bombas de água e pelo modo como o sistema de climatização faz a transferência de calor com o espaço. A bomba de calor geotérmica faz a transferência de calor por radiação através do piso radiante, que se verifica menos eficaz que o modo de transferência de calor através da introdução de ar climatizado, utilizado pela bomba de calor ar-ar.

O gráfico da *Figura 25* faz a comparação do consumo energético na climatização do sistema “mais eficiente” (ME) para ambas as casas (*casa envidraçada-ME* e *casa passiva-ME*) e do sistema “pouco eficiente” (PE) (*casa envidraçada-PE* e *casa passiva-PE*).

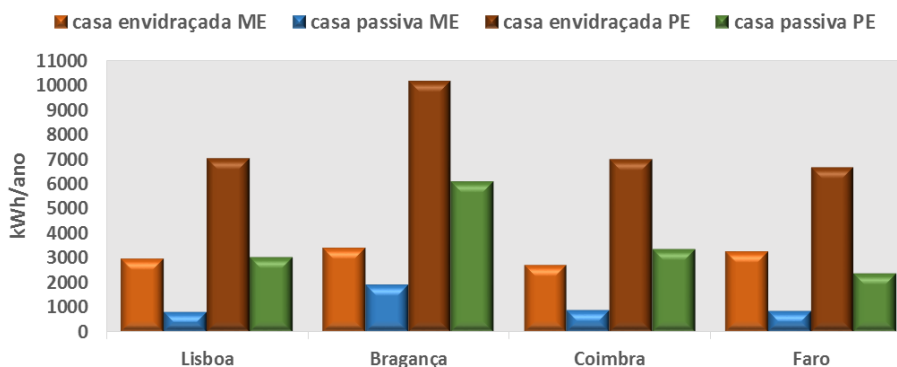


Figura 25 – Consumo energético na climatização.

A *casa passiva-ME* apresenta um consumo energético na climatização 44% a 74% inferior ao da *casa envidraçada-ME*, por outro lado, a *casa passiva-PE* apresenta um consumo energético na climatização 40% a 64% inferior ao da *casa envidraçada-PE*.

### 7.5 Consumo energético para AQS

As necessidades energéticas de AQS (águas quentes sanitárias) é igual para ambas as casas, cerca de 1932 kWh/ano. Estas necessidades serão supridas por um sistema solar térmico. No entanto, para uma análise elucidativa do consumo elétrico no aquecimento de AQS, foi utilizado uma bomba de calor com COP 2,5 para suprir as necessidades de AQS, a que se chegou a um consumo elétrico de 773 kWh/ano.

### 7.6 Consumos energéticos globais

Os gráficos seguintes apresentam os requisitos totais de eletricidade, caso nenhum sistema de energia renovável (solar fotovoltaico e solar térmico) esteja instalado. Foram incluídos dois perfis de eficiência energética:

- **mais eficiente (ME)** – onde a casa está dotada de um sistema de climatização, eletrodomésticos e iluminação mais eficientes;
- **pouco eficiente (PE)** – onde a casa está dotada de um sistema de climatização, eletrodomésticos e iluminação pouco eficientes.

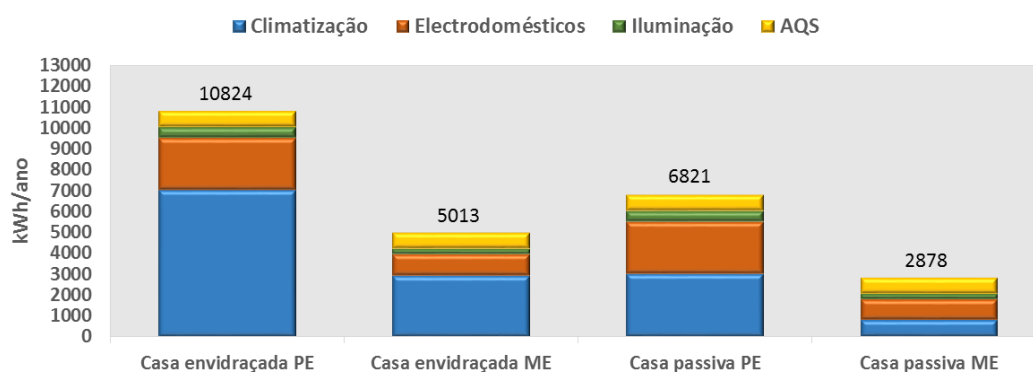


Figura 26 – Consumo energético: Lisboa.

Em Lisboa, verifica-se que a *casa envidraçada-PE* é a casa que apresenta maior consumo energético. Os sistemas, com maior contribuição no consumo, é a climatização (65%) e os eletrodomésticos (23%). Como a *casa envidraçada-ME* está dotada de sistemas mais eficientes, nomeadamente no sistema de climatização e eletrodomésticos, consegue ter poupanças significativas (menos 54%) no consumo de eletricidade.

Nesta região, a *casa passiva-PE* é a casa que apresenta maior consumo energético. A climatização e os eletrodomésticos têm peso semelhante no consumo energético do edifício, com 44% e 36% respetivamente. Por outro lado, a *casa passiva-ME* consegue reduzir 58% do consumo energético, verificando-se um maior equilíbrio da contribuição dos sistemas no consumo elétrico global do edifício.

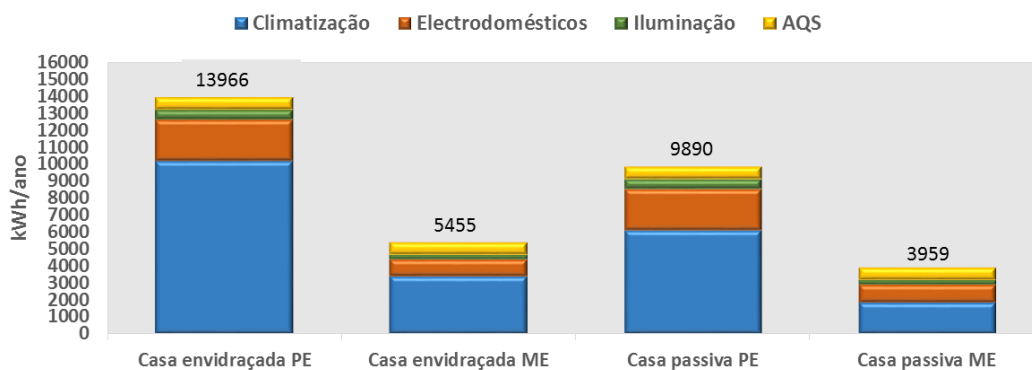


Figura 27 – Consumo energético: Bragança.

Em Bragança, a *casa envidraçada-PE* é a casa que apresenta maior consumo energético, sendo a climatização o sistema com maior contribuição. O consumo eléctrico para a climatização representa 73% do consumo total do edifício. Quanto à *casa envidraçada-ME*, esta apresenta um consumo energético global 61% inferior, em relação com a *casa envidraçada-PE*.

Nesta região, a *casa passiva-PE* apresenta maior consumo energético – verifica-se que o consumo energético na climatização representa 62% do consumo total do edifício. Por outro lado, a *casa passiva-ME* consegue reduzir 60% o consumo energético, verifica-se também uma diminuição do peso energético da climatização passando a representar 48% do consumo energético total do edifício.

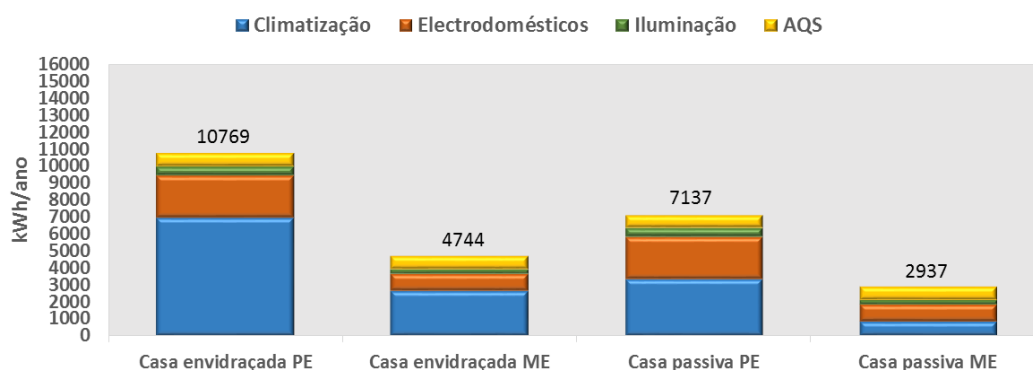


Figura 28 – Consumo energético: Coimbra.

Em Coimbra, a *casa envidraçada-PE* é a casa que apresenta maior consumo energético, os sistemas com maior contribuição nesse consumo é a climatização (65%) e os eletrodomésticos (23%). Como a *casa envidraçada-ME* está dotada de sistemas mais eficientes, nomeadamente no sistema de climatização e eletrodomésticos, consegue ter poupanças significativas (menos 56%) no consumo de eletricidade.

Nesta região, a *casa passiva-PE* apresenta um maior consumo energético, a climatização e os eletrodomésticos têm peso semelhante no consumo energético do edifício, com 47% e 35% respetivamente. Por outro lado, a *casa passiva-ME* consegue reduzir 59% o consumo energético e verifica-se um maior equilíbrio da contribuição dos sistemas, no consumo elétrico global do edifício.

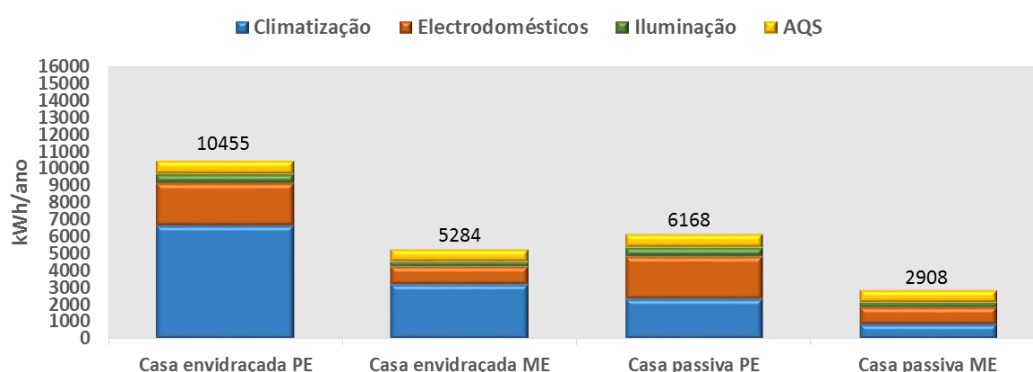


Figura 29 – Consumo energético: Faro.

Em Faro, a *casa envidraçada-PE* é a casa que apresenta maior consumo energético, os sistemas com maior contribuição nesse consumo é a climatização (64%) e os eletrodomésticos (24%).



Por outro lado, a *casa envidraçada-ME* consegue ter poupanças significativas (menos 49%) no consumo de eletricidade.

Nesta região, a *casa passiva-PE* apresenta um maior consumo energético, a climatização e os eletrodomésticos têm peso semelhante no consumo energético do edifício, com 39% e 40% respetivamente. Por outro lado, a *casa passiva-ME* consegue reduzir 53% o consumo energético e verifica-se um maior equilíbrio da contribuição dos sistemas, no consumo elétrico global do edifício.

## 8. Impactos ambientais

Para analisar o impacto ambiental das casas em estudo, caso não disponham de nenhum sistema de energia renovável, recorreu-se ao despacho nº 15793-D do DL118/2013. No cálculo foi utilizado um fator de conversão de energia final para a energia primária ( $F_{pu} = 2,5 \text{ kWh}_{EP}/\text{kWh}$ ) e um fator de conversão de energia primária ( $0,144 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$ ), para obter as emissões totais de  $\text{CO}_2$  de cada casa. A tabela seguinte mostra as emissões totais de  $\text{CO}_2$  de cada casa para as várias regiões.

Tabela 13- Emissões de  $\text{CO}_2$

	Casa envidraçada PE	Casa envidraçada ME	Casa passiva PE	Casa passiva ME
Região	Emissões de $\text{CO}_2$ $\text{kgCO}_2/\text{ano}$	Emissões de $\text{CO}_2$ $\text{kgCO}_2/\text{ano}$	Emissões de $\text{CO}_2$ $\text{kgCO}_2/\text{ano}$	Emissões de $\text{CO}_2$ $\text{kgCO}_2/\text{ano}$
Lisboa	3897	1805	2456	1036
Bragança	5028	1964	3560	1425
Coimbra	3877	1708	2569	1057
Faro	3764	1902	2220	1047

As emissões de  $\text{CO}_2$  nas casas em estudo são proporcionais aos seus consumos de eletricidade. Comparando com as casas mais eficientes, as casas pouco eficientes emitem cerca do dobro de  $\text{CO}_2$  por ano. Dentro das casas mais eficientes, a *casa passiva-ME* é a casa que apresenta menores emissões de  $\text{CO}_2$ . Comparado com a *casa envidraçada-ME*, a *casa passiva-ME* permite uma redução significativa das emissões de  $\text{CO}_2$ , principalmente nas regiões de Lisboa (-43%) e Faro (-45%).

## 9. Produção energética

### 9.1 Sistema solar térmico

O sistema solar térmico foi dimensionado tendo em conta 1 m<sup>2</sup> de coletor solar por pessoa. Com base nesse pressuposto, escolheu-se 2 coletores solares com sensivelmente 2 m<sup>2</sup> cada para conseguir cobrir quase todas as necessidades de AQS. Quando o sistema solar térmico não conseguir suprir as necessidades de AQS, este recorre a um sistema de apoio elétrico. Caso o sistema solar térmico fosse dimensionado de modo a cobrir todas as necessidades de AQS durante todo ano, haveria grande desperdício devido ao excesso de produção solar térmica – principalmente no verão, pelo que não compensaria o investimento.

O sistema solar térmico escolhido foi o Kit Solar *Sonnenkraft* modelo *Compact E*, que inclui:

- 2 coletores solares, modelo SCE 202-S;
- um depósito acumulador, modelo DHWB300PR2, com 300L de capacidade;
- 1 grupo de circulação RLG-E;
- 1 Controlador de 2 circuitos SKSC2HE;
- 1 válvula misturadora termostática TBM20;
- 1 vaso de expansão AG25S, anticongelante (10 L);
- fixações para os painéis.

A simulação do sistema solar térmico foi efetuada com recurso ao programa *SolTerm 5.1*, desenvolvido pelo LNEG. A *Tabela 14* mostra a energia térmica fornecida pelo sistema e pelo apoio para cada região, mostra também a inclinação e o azimute ótimos dos módulos solares térmicos.

Tabela 14 – Energia térmica fornecida pelo sistema solar térmico e pelo sistema de apoio

	Módulos ST Quantidade	Inclinação °	Azimute °	Fornecido kWh/ano	Apoio kWh/ano
Lisboa	2	28	30	1586	316
Bragança	2	31	sul	1489	413
Coimbra	2	25	45	1462	439
Faro	2	22	45	1595	307

Os resultados da simulação mostram que o sistema solar térmico consegue cobrir 77% a 84% das necessidades anuais de AQS.

## 9.2 Sistema solar fotovoltaico

No dimensionamento do sistema fotovoltaico, pressupôs-se que o edifício está dotado de coletores solares térmicos. Alterou-se portanto, o consumo elétrico de AQS utilizado na análise dos consumos elétricos globais do edifício, contabilizando apenas o consumo elétrico do apoio do sistema solar térmico.

Na simulação do sistema solar fotovoltaico, escolheu-se coletores fotovoltaicos da marca *Sunmodule* modelo *Plus SW 285 mono* com 285 Wp de potência. A simulação através do programa *SolTerm 5.1*, desenvolvido pelo *LNEG*. As tabelas seguintes mostram os resultados da simulação: número de coletores fotovoltaicos necessários; área necessária para a instalação dos mesmos; e energia elétrica fornecida pelo sistema fotovoltaico.

Tabela 15 – Energia elétrica fornecida pelo sistema solar fotovoltaico – Lisboa

	Lisboa					
	Necessidades eléctricas kWh/ano	Módulos FV Quantidade	Inclinação °	Azimuth °	Área necessária m <sup>2</sup>	Fornecido kWh/ano
Casa envidraçada PE	10367	44	34	Sul	74	10364
Casa envidraçada ME	4556	20	34	Sul	34	4711
Casa passiva PE	6364	28	34	Sul	47	6596
Casa passiva ME	2421	11	34	Sul	19	2591

Tabela 16 – Energia elétrica fornecida pelo sistema solar fotovoltaico – Bragança

	Bragança					
	Necessidades eléctricas kWh/ano	Módulos FV Quantidade	Inclinação °	Azimuth °	Área necessária m <sup>2</sup>	Fornecido kWh/ano
Casa envidraçada PE	13606	62	33	Sul	104	13917
Casa envidraçada ME	5095	23	33	Sul	39	5163
Casa passiva PE	9530	43	33	Sul	72	9652
Casa passiva ME	3599	17	33	Sul	29	3817

Tabela 17 – Energia elétrica fornecida pelo sistema solar fotovoltaico – Coimbra

	Coimbra					
	Necessidades eléctricas kWh/ano	Módulos FV Quantidade	Inclinação °	Azimuth °	Área necessária m <sup>2</sup>	Fornecido kWh/ano
Casa envidraçada PE	10435	48	35	Sul	81	10638
Casa envidraçada ME	4410	21	35	Sul	35	4654
Casa passiva PE	6803	31	35	Sul	52	6870
Casa passiva ME	2603	12	35	Sul	20	2660

Tabela 18 – Energia elétrica fornecida pelo sistema solar fotovoltaico – Faro

	Faro					
	Necessidades eléctricas kWh/ano	Módulos FV Quantidade	Inclinação °	Azimuth °	Área necessária m <sup>2</sup>	Fornecido kWh/ano
Casa envidraçada PE	9989	41	32	Sul	67	10061
Casa envidraçada ME	4818	20	32	Sul	34	4908
Casa passiva PE	5702	24	32	Sul	40	5890
Casa passiva ME	2442	10	32	Sul	17	2454

Como esperado, a *casa envidraçada-PE* com eletrodomésticos pouco eficientes, necessita de grande capacidade fotovoltaica instalada e de maior área disponível para a colocação dos módulos fotovoltaicos. Bragança é a região onde a *casa envidraçada-PE* requer mais capacidade fotovoltaica (62 módulos fotovoltaicos), ocupando uma área de 104 m<sup>2</sup> – que é quase a totalidade da área do edifício (110 m<sup>2</sup>).

Por outro lado, a *casa passiva-ME* necessita de apenas alguns módulos fotovoltaicos para suprir as necessidades de energia anuais – cerca de 4 vezes menos que a *casa envidraçada-PE* e uma pequena fração da área do edifício. Faro é a região onde a *casa passiva-ME* requer menor capacidade fotovoltaica – apenas 10 módulos fotovoltaicos ocupando uma área de 17 m<sup>2</sup>.

## 10. Análise de custo do sistema fotovoltaico

A análise de custo foi realizada com base nos custos do equipamento do sistema fotovoltaico, não estando contabilizados os custos de instalação nem os equipamentos da instalação. O investimento necessário, para dotar os modelos com sistemas fotovoltaicos em cada região, pode ser observado nas seguintes tabelas:

Tabela 19 – Custo do sistema solar fotovoltaico – Lisboa

	Lisboa				
	Módulos FV Quantidade	Custo Módulos FV €	Inversor	Custo inversor €	Custo total €
Casa envidraçada PE	44	15.424 €	Sunny Tripower STP 10000 TL-20	3.629 €	<b>19.053 €</b>
Casa envidraçada ME	20	7.011 €	Sunny Tripower STP 5000 TL-20	2.466 €	<b>9.477 €</b>
Casa passiva PE	28	9.815 €	Sunny Tripower STP 10000 TL-20	3.629 €	<b>13.444 €</b>
Casa passiva ME	11	3.856 €	SB 3600TL/V	1.903 €	<b>5.759 €</b>

Tabela 20 – Custo do sistema solar fotovoltaico – Bragança

	Bragança				
	Módulos FV Quantidade	Custo Módulos FV €	Inversor	Custo inversor €	Custo total €
Casa envidraçada PE	62	21.734 €	FLX Pro Pn:15kW	3.348 €	<b>25.082 €</b>
Casa envidraçada ME	23	8.063 €	Sunny Tripower STP 5000 TL-20	2.466 €	<b>10.529 €</b>
Casa passiva PE	43	15.074 €	Sunny Tripower STP 10000 TL-20	3.629 €	<b>18.702 €</b>
Casa passiva ME	17	5.959 €	Sunny Tripower STP 5000 TL-20	2.466 €	<b>8.426 €</b>

Tabela 21 – Custo do sistema solar fotovoltaico – Coimbra

	Coimbra				
	Módulos FV Quantidade	Custo Módulos FV €	Inversor	Custo inversor €	Custo total €
Casa envidraçada PE	48	16.826 €	Sunny Tripower STP 12000 TL-20	4.140 €	<b>20.967 €</b>
Casa envidraçada ME	21	7.362 €	Sunny Tripower STP 5000 TL-20	2.466 €	<b>9.828 €</b>
Casa passiva PE	31	10.867 €	Sunny Tripower STP 10000 TL-20	3.629 €	<b>14.496 €</b>
Casa passiva ME	12	4.207 €	SB 3600TL/V	1.903 €	<b>6.109 €</b>

Tabela 22 – Custo do sistema solar fotovoltaico – Faro

	Faro				
	Módulos FV Quantidade	Custo Módulos FV €	Inversor	Custo inversor €	Custo total €
Casa envidraçada PE	41	14.373 €	Sunny Tripower STP 10000 TL-20	3.629 €	<b>18.001 €</b>
Casa envidraçada ME	20	7.011 €	Sunny Tripower STP 5000 TL-20	2.466 €	<b>9.477 €</b>
Casa passiva PE	24	8.413 €	Sunny Tripower STP 10000 TL-20	3.629 €	<b>12.042 €</b>
Casa passiva ME	10	3.506 €	SB 3600TL/V	1.903 €	<b>5.408 €</b>

Posto isto, a *casa passiva-ME* é a casa que necessita de menor investimento, entre 5.408€ e os 8.426€, para dotar este edifício com um sistema fotovoltaico. No que diz respeito à *casa envidraçada-PE*, é a casa que necessita de maior investimento, 18.001€ e os 25.082€, para dotar este edifício com o mesmo sistema.

## 11. Análise simples do tempo de retorno do investimento e lucro do sistema fotovoltaico

Para calcular o *tempo de retorno do investimento* (TRI) do sistema fotovoltaico, considerou-se: que o edifício beneficia do programa do autoconsumo, previsto no decreto de lei DL nº153/2014, e o custo de eletricidade de 0,1602 €/kWh, em vigor no decorrente ano. O TRI é calculado tendo em conta: o investimento inicial ( $I_i$ ); a eletricidade (E) que o edifício

Os sistemas energéticos para habitação autossustentável em clima Português: simulação e análise energética  
necessitaria, caso não tivesse um sistema fotovoltaico; e o custo de eletricidade (CE), através da seguinte expressão:

$$TRI = \frac{I_i}{E * CE} \quad (15)$$

Tabela 23 - Tempo de retorno do investimento (anos) para cada casa em cada região

Tempo de retorno do investimento (anos)				
	Lisboa	Bragança	Coimbra	Faro
Casa envidraçada PE	9	10	10	9
Casa envidraçada ME	10	10	10	9
Casa passiva PE	10	10	10	9
Casa passiva ME	10	10	10	9

Analisando a *Tabela 23*, verifica-se que o retorno do investimento faz-se em 9 a 10 anos, para todas as casas, nas várias regiões. Como o sistema fotovoltaico tem uma durabilidade superior a 20 anos, ainda ter-se-á pelo menos 10 a 11 anos de lucro.

As figuras seguintes mostram simples cenários da rentabilidade financeira do sistema fotovoltaico, para os vários modelos em cada região – o ano 0 representa o investimento inicial e o retorno financeiro ocorre quando o lucro é zero.

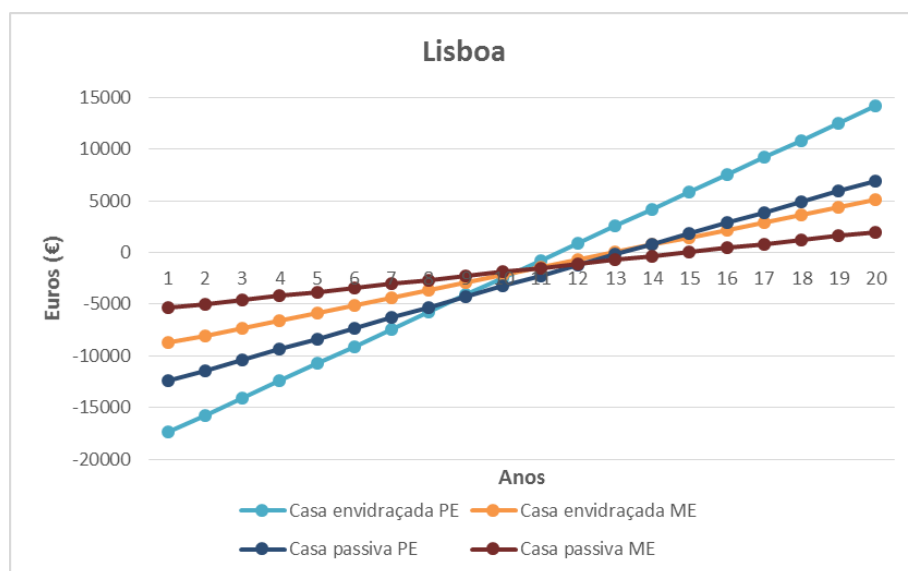


Figura 30 – Senário da rentabilidade financeira do sistema fotovoltaico: Lisboa

Em Lisboa, a *casa envidraçada-PE* é a que apresenta maior lucro (14.163€) ao fim de 20 anos, pelo que o sistema fotovoltaico apresenta uma rentabilidade total de 174% do investimento

Os sistemas energéticos para habitação autossustentável em clima Português: simulação e análise energética realizado. Por outro lado, a *casa passiva-ME* é a casa que apresenta menor lucro (1.997€) ao fim de 20 anos, pelo que o sistema fotovoltaico apresenta uma rentabilidade 135% do investimento realizado.

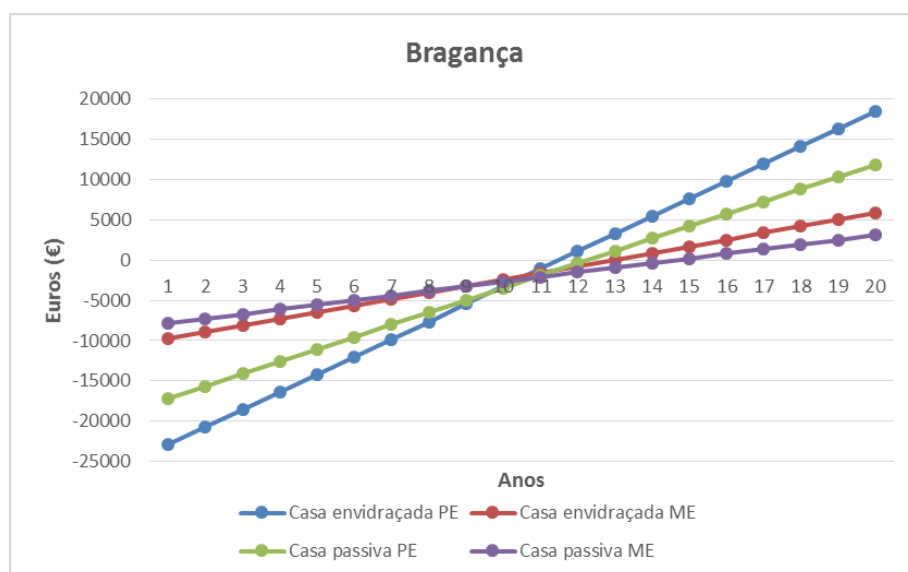


Figura 31 – Senário da rentabilidade financeira do sistema fotovoltaico: Bragança

Em Bragança, a *casa envidraçada-PE* é o modelo que apresenta maior lucro (18.511€) ao fim de 20 anos, pelo que o sistema fotovoltaico apresenta uma rentabilidade 174% relativamente ao investimento realizado. Por outro lado, a *casa passiva-ME* é a casa que apresenta menor lucro (3.107€) ao fim de 20 anos, pelo que o sistema fotovoltaico apresenta uma rentabilidade 137% do investimento realizado.

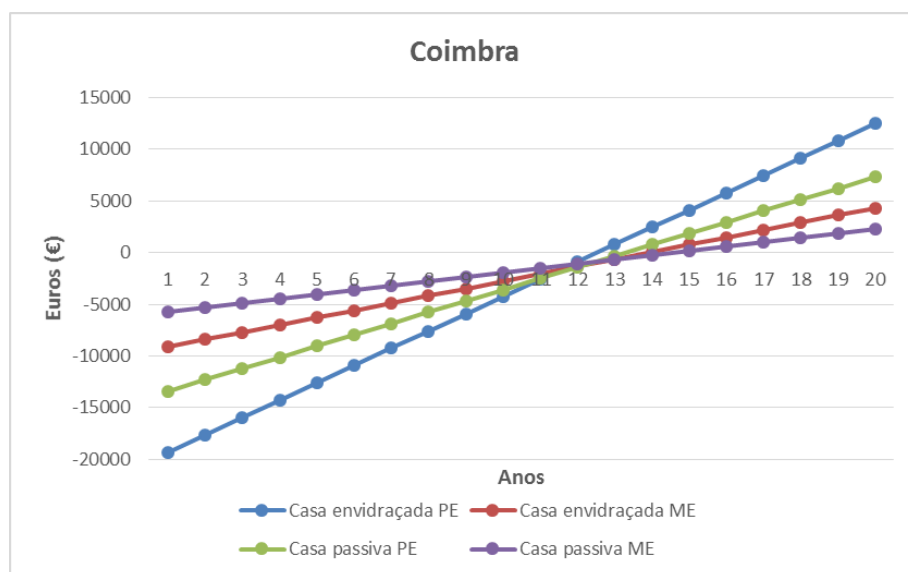


Figura 32 – Senário da rentabilidade financeira do sistema fotovoltaico: Coimbra

Em Coimbra, a *casa envidraçada-PE* é o modelo que apresenta maior lucro (12.467€) ao fim de 20 anos, pelo que o sistema fotovoltaico apresenta uma rentabilidade 159% do investimento realizado. Por outro lado, a *casa passiva-ME* é o modelo que apresenta menor lucro (2.230€) ao fim de 20 anos, pelo que o sistema fotovoltaico apresenta uma rentabilidade 137% do investimento realizado.

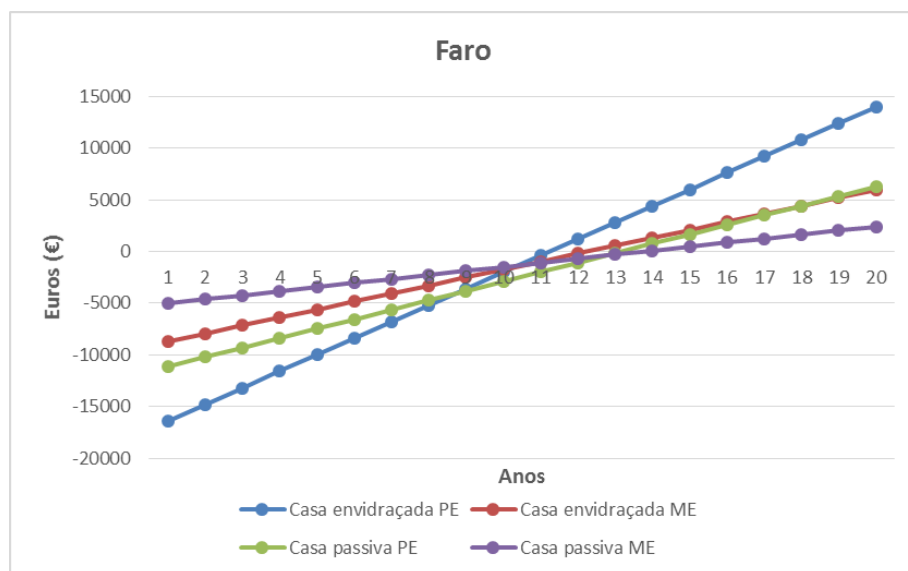


Figura 33 – Senário da rentabilidade financeira do sistema fotovoltaico: Faro

Na região de Faro, a *casa envidraçada-PE* é a casa que apresenta maior lucro (14.003€) ao fim de 20 anos, pelo que o sistema fotovoltaico apresenta uma rentabilidade 178% do investimento realizado. Por outro lado, a *casa passiva-ME* é a casa que apresenta menor lucro (2.416€) ao fim de 20 anos, pelo que o sistema fotovoltaico apresenta uma rentabilidade 145% do investimento realizado.



## 12. Conclusão

Neste estudo foram analisadas duas habitações unifamiliares, com comportamento térmico distintos e verificou-se que:

- o modelo *casa passiva* é o modelo que mais adequado ao clima português, apresentando menores necessidades de climatização;
- a melhor orientação é a fachada principal virada entre Sul e a 10° oeste.

Analisou-se também as influências da iluminação e dos eletrodomésticos no consumo energético do edifício.

- dotar o edifício com iluminação LED e eletrodomésticos eficientes reduz o consumo energético em 1732 kWh/ano, cerca de 57%.

Foram estudados três tipos de sistemas de climatização, onde se verificou que:

- o sistema bomba de calor ar-ar é o mais eficiente;
- este sistema reduz 67% a 74% no consumo energético da climatização, comparando com o sistema chiller mais caldeira elétrica.

Foi também analisada a pegada ambiental de cada edifício e concluiu-se que:

- as casas mais eficientes (*casa envidraçada-ME* e *casa passiva-ME*) reduzem em metade as emissões de CO<sub>2</sub>;
- a *casa passiva-ME* é o modelo com menores emissões de CO<sub>2</sub>, reduz 45% das emissões em relação à *casa envidraçada-ME*.

Equipar o edifício unifamiliar com cerca de 4 m<sup>2</sup> de coletores solares, supre quase todas as necessidades de AQS, cerca de 77% a 84%. Tendo-se concluído que caso o sistema solar térmico fosse dimensionado para suprir todas as necessidades de AQS, haveria grande desperdício, devido ao excesso de produção solar térmica, principalmente no verão, não compensando o investimento.

Este estudo analisou também a viabilidade das habitações unifamiliares estudadas no contexto NZEB, através de um sistema fotovoltaico, nas várias regiões de Portugal.

Concluiu-se que a área necessária para a implementação do sistema fotovoltaico, por forma a tornar a casa num edifício NZEB, varia significativamente de acordo com:

- a geometria da casa;
- a eficiência do sistema de climatização;
- a eficiência dos eletrodomésticos e iluminação;
- e a região a que se insere.

O custo inicial para a implementação do sistema fotovoltaico é:

- para a *casa passiva-ME* - 5 400€ a 8 400€;
- para a *casa envidraçada-PE* - 18 000€ a 25 000€.

O retorno do investimento do sistema NZEB, enquadrado no programa de produção para autoconsumo, faz-se em 9 a 10 anos em todos os modelos para todas as regiões, pelo que torna viável a implementação NZEB.

Foi feita ainda uma análise da rentabilidade do sistema NZEB para 20 anos:

- a *casa passiva-PE* é a que apresenta maiores lucros, 12 500€ a 18 500€;
- a *casa passiva-ME* apresenta lucros de 2 000€ a 3 100€.

(Estes lucros apenas refletem a poupança na fatura energética.)

A *casa passiva-ME* é a habitação unifamiliar mais adequada ao clima português, devido ao bom comportamento térmico e também aos seus sistemas eficientes.

A *casa passiva-ME*, além de ter baixas necessidades energéticas e reduzida pegada ecológica, necessita apenas de um pequeno investimento para se enquadrar no modelo NZEB.

### 13. Referências

- Graça, G. C., Augusto, A., Lerer, M. M.. (2012) “*Solar powered net energy houses for southern Europe: Feasibility study*”.
- Gonçalves, H., Graça, J.. (2004) “*Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal*”. INETI.
- Ford, B., Schiano-Phan, R., Zhongcheng, D.. (2007) “*A Norma de Passivhaus em Climas Quentes da Europa: Directrizes de Projecto para Casas Confortáveis de Baixo Consumo Energético*”. Passive-On project.
- Crawley, D.B.. (2001) ENERGYPLUS, “*A New-Generation Building Energy Simulation Program. Proceedings of Building Simulation*”. U.S. Department of Energy.
- Eur-Lex. (2010) Directiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação).
- ADENE. (2010) “*Guia da Eficiência Energética*”.
- DGEG, INE. (2010) “*Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico*” (ICESD).
- Ganhão, A. (2011) “*Construção Sustentável – Propostas de Melhoria de Eficiência Energética em Edifícios de Habitação*”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa.
- U.S. DOE. (2013). “*Getting Started with EnergyPlus. EnergyPlus Documentation*”.  
<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/gettingstarted.pdf>
- Ginjeira, A. (2010) “*Simulação e Análise Custo – Benefício de sistemas energéticos para uma habitação unifamiliar em clima português, com foco em sistemas geotérmicos*”. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente, Universidade de Lisboa.
- Figueiredo, R. (2013) “*Optimização de um sistema de arrefecimento solar térmico para um edifício de serviços no sul da Europa*”. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente, Universidade de Lisboa.
- Santos, C. A., Matias, L. C. (2006). ITE 50. “*Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios*”. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- NaturalWorks. (2009). “*Curso de iniciação – Simulação em EnergyPlus*”.
- D.R. (4 de Abril de 2006). DL n°80/2006 – “*Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios*”. Diário da República, pp. 2416-2468.
- ADENE. (2011) “*Perguntas & Respostas sobre o RCCTE*”.
- Martins, A. (2010) “*Contribuição da Parede de Trombe na Redução dos Consumos Energéticos dos Edifícios*”; Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Trás-os-Montes e Alto Douro.
- PST. (2013) “*Sistemas solares térmicos*”. <http://www.painelsolartermico.com/sistemas-solares-termicos>
- Pereira, F., Oliveira M.. (2011) “*Curso Técnico Instalador De Energia Solar Fotovoltaica*”. Publindústria.
- GREENPRO. (2004) “*Energia Solar Térmica manual sobre as tecnologias, projeto e instalação*”.

GREENPRO. (2004) *“Energia Fotovoltaica manual sobre as tecnologias, projeto e instalação”*.

UNIA. (2012) Universidad Internacional de Andalucía. [http://ocw.unia.es/ciencias-tecnologicas/disen-de-sistemas-fotovoltaicos/materiales-de-estudio-1/tema1/skinless\\_view](http://ocw.unia.es/ciencias-tecnologicas/disen-de-sistemas-fotovoltaicos/materiales-de-estudio-1/tema1/skinless_view)

Ecosave. (2012) *“Guia para a utilização eficiente dos electrodomésticos”*. ENA. [http://www.ecosave.org.pt/download/Guia\\_LWR.pdf](http://www.ecosave.org.pt/download/Guia_LWR.pdf)

ADENE. (2011) *“A luz certa em sua casa”*. <http://www.adene.pt/sites/default/files/Documentos/luzcerta4edio.pdf>

Archiproducts. (2013) <http://www.archiproducts.com/pt/506/instalacoes-de-aquecimento-e-climatizacao-radiadores-e-ventiloconvectores.html>

ADENE. (2008) *“Eficiência energética nos edifícios residenciais”*. Intelligent Energy Europe.

EGEC. (2008) *“Ground source heat pump: A guide book An action for the promotion and the dissemination of successful technologies in the ground source heat pump (GSHP) field”*.

Vulcano (2010) [https://vulcano.pt.resource.bosch.com/media/vulcano/documenta\\_\\_o/cat\\_logo\\_de\\_produtos/aquecimento\\_central\\_e\\_aqs/vu\\_caldeiras\\_\\_muraais\\_2010.pdf](https://vulcano.pt.resource.bosch.com/media/vulcano/documenta__o/cat_logo_de_produtos/aquecimento_central_e_aqs/vu_caldeiras__muraais_2010.pdf)

Sarma Pisupati, (2014) Penn State’s College of Earth and Mineral Sciences. <https://www.e-education.psu.edu/egge102/node/2053>

C. A. De Swardt, J. P. Meyer. (2001) *“A performance comparison between a air-source and a ground-source reversible heat pump”*, 2001

Ioan, S., Calin, S.. (2013) *“General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings”*.

Caleffi. (2009) Revista hidráulica: *“As bombas de calor”*. [http://www.caleffi.com/sites/default/files/file/Hidr%C3%A1ulica\\_28.pdf](http://www.caleffi.com/sites/default/files/file/Hidr%C3%A1ulica_28.pdf)

Lamberts, R.. (2011) *“Conforto e Stress Térmico”*. LabEEE

Graça, G. C. (2011). Apontamentos do módulo de Sistemas Energéticos em Edifícios.

Bosch. (2014) <http://www.bosch-home.pt>

Águas M. P. (2001) *“Conforto térmico – Métodos Instrumentais em Energia e Ambiente”*.

MEP. (2004) *“Eficiência energética em equipamentos e sistemas elétricos no sector residencial”*. Ministério da economia de Portugal

FFSolar, energias renováveis, Lda. (2015)

Sotecnisol. (2014) [http://www.sotecnisol.pt/resources/tabelas\\_de\\_preco/solar\\_termico\\_circulacao\\_forcada\\_2014.pdf](http://www.sotecnisol.pt/resources/tabelas_de_preco/solar_termico_circulacao_forcada_2014.pdf)

D.R. (20 de Outubro de 2014). DL nº153/2014 – *“Produção de eletricidade para autoconsumo.”* Diário da República, pp. 5298-5311.

ERSE. (2015) Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos.

## 14. Anexo A – Cálculo do consumo energético – Máquina de lavar roupa

Máquina de Lavar Roupa					
Marca/Modelo	Característica	Classe eficiência energética	Capacidade de carga	Consumo de água anual*	Consumo de energia anual*
Bosch/WAQ24417EE	Bitérmica	A+++	7 Kg	8 140 L/ano	62 kWh/ano**
Bosch/WAQ20367EE	Normal	A+++	7 Kg	8 140 L/ano	174 kWh/ano
* Com base em 220 ciclos de lavagem a 60°C e 40°C e com meia carga e carga completa					
** Com base no fornecimento de água quente solar a 40°C					
Os dois modelos apresentam o mesmo consumo no seu funcionamento normal. Contudo podemos estimar o consumo energético da máquina bitérmica fornecida com água quente solar a partir da primeira lei da termodinâmica					
Energia necessária para elevar a temperatura da água é calculada pela seguinte fórmula:				Q=m.c.ΔT	
Calor específico água (c=4186 J/(kg °C))				Dados	
				Temperatura média água lavagem= 50 °C	
				Temperatura média água rede= 15 °C	
Q=	5420870 J	Consumo médio água total/ciclo=37 L =37 kg			
Q=	1506 W				
Qágua=	331 kWh/ano				
→ Energia necessária para aquecer 37 L de água a 50 °C					
<b>Nota:</b> A energia necessária para aquecer 8140 L de água de 15°C para 50°C é 331,3 kWh/ano, que ultrapassa bastante o consumo referido pela marca. Fez-se uma estimativa que na verdade a máquina aquece 17,5 L de água dos 37 L de água que consome por lavagem. Assim sendo, energia necessária para aquecer água anual fica-se pelos 152,2 kWh/ano.					
Fração da energia real para aquecer a água [%]	(1-Qmáquina)/Qágua	47%	Considerações		
Quantidade de água quente/ciclo [L]	consumo total de água (37L)*Fração(47%)	17,5	Temperatura média água lavagem= 50 °C		
Q= 1831375 J			Temperatura média da água solar=40 °C		
			Temperatura média água rede= 15 °C		
			ΔT=25 °C		
Q=	509 W	Consumo médio água total/ciclo=37 L =37 kg			
Qsolartérmico= 112				Consumo médio água quente/ciclo=17,5 L =17,5 kg	
kWh/ano → Energia fornecida pelo sistema solar térmico					
Consumo de energia=	Qmáquina-Qsolartérmico	=62	kWh/ano	→ Energia consumida pela máquina de lavar roupa bitérmica	

## 15. Anexo B – Cálculo do consumo energético – Máquina de lavar louça

Máquina de Lavar Louça					
Marca/Modelo	Característica	Classe eficiência energética	Capacidade de carga	Consumo de água anual*	Consumo de energia anual*
Bosch/SMV63M60EU	Bitérmica	A++	13 serviços	2 800 L/ano	110 kWh/ano**
Bosch/SMV58N70EP	Normal	A++	13 serviços	1680 L/ano	262 kWh/ano
* Com base em 280 ciclos de lavagem no programa ECO 50, com água a 50 °C					
** Com base no fornecimento de água quente solar a 40 °C					
Os dois modelos apresentam o mesmo consumo no seu funcionamento normal. Contudo podemos estimar o consumo energético da máquina bitérmica fornecida com água quente solar a partir da primeira lei da termodinâmica					
Energia necessária para elevar a temperatura da água é calculada pela seguinte fórmula: <b><math>Q=m.c.\Delta T</math></b>					
Calor específico água (c)=4186 J/kg °C			Considerações		
			Temperatura água lavagem= 50 °C		
			Temperatura média da água solar=40 °C		
			Temperatura média água rede= 15 °C		
			$\Delta T=2\text{ °C}$		
			Consumo médio água total/ciclo=10 L =10 kg		
		Q= 1046500 J			
		Q= 291 W			
	<b>Qsolartérmico=</b>	<b>64</b>	<b>kWh/ano</b>	→ Energia fornecida pelo sistema solar térmico	
<b>Consumo de energia=</b>	<b>Qmáquina- Qsolartérmico</b>	<b>=110</b>	<b>kWh/ano</b>	→ Energia consumida pela máquina de lavar louça bitérmica	